



Modèles d'intégration des designers créatifs dans les processus de conception industriels

Pierre-Antoine Arrighi

► To cite this version:

Pierre-Antoine Arrighi. Modèles d'intégration des designers créatifs dans les processus de conception industriels. Gestion et management. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014. Français. NNT : 2014ENMP0016 . pastel-01069075

HAL Id: pastel-01069075

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01069075>

Submitted on 26 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 395: Économie, Organisation & Société

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École nationale supérieure des mines de Paris

Spécialité “ Sciences de Gestion ”

présentée et soutenue publiquement par

Pierre-Antoine ARRIGHI

le 26 Mars 2014

**Modèles d'intégration des designers créatifs
dans les processus de conception industriels**

Directeurs de thèse : **Pascal LE MASSON**
Benoit WEIL

Jury

M. Ameziane AOUSSAT, Directeur de Recherche - Professeur, CPI, École Nationale des Arts et Métiers
Mme Anne ASENSIO, Vice-Présidente Design Experience, Design Studio, Dassault Systèmes
M. Roland DE GUIO, Professeur, LGECO, INSA Strasbourg
M. Tomás DORTA, Professeur, Hybridlab, Université de Montréal
M. Alain FINDELI, Professeur, Département Sciences & Arts, Université de Nîmes
M. Pascal LE MASSON, Directeur de Recherche - Professeur, CGS, Mines ParisTech
Mme Frédérique PAIN, Directrice de Recherche, Strate Collège designers
M. Benoit WEIL, Professeur, CGS, Mines ParisTech

Rapporteur
Examineur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

**T
H
È
S
E**

Mines ParisTech n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse. Ces opinions doivent être considérées comme propres à l'auteur

What is not constrained is not creative.
Professor Philip N. Johnson Laird

Modèles d'intégration des designers créatifs dans les processus de conception industriels

RESUME :

De décisifs et puissants enjeux d'innovation ainsi que de renouvellement de l'identité des objets bouleversent le monde industriel. De telles aptitudes créatives sont usuellement associées aux designers industriels. Cependant, ces professionnels ne sont actuellement pas intégrés dans les processus numériques de conception.

Afin de décrire ce paradoxe, nous formulons l'hypothèse que, l'omniprésence dans l'industrie de modèles de la conception de type séquentiel, qui juxtaposent créativité et développement produit, entrave l'intégration des designers industriels au sein des processus industriels. En effet, en compartimentant la conception en silos, ce type de modèles généralistes inhibe les méthodes spécifiques des concepteurs créatifs. Bien plus, les outils numériques adjoints au modèle séquentiel étant calqués sur sa logique, ils reproduisent les inconvénients d'une telle structuration.

En mobilisant quatre disciplines académiques qui traitent des outils numériques, à savoir les sciences informatiques, cognitives, de gestion et les théories de la conception, nous élaborons un nouveau modèle «dit stratifié». Ce dernier révèle les modes de raisonnement empruntés par les concepteurs créatifs ainsi que la nature des produits élaborés dans les environnements logiciels. A ce titre, l'entreprise Dassault Systèmes ainsi que la suite CATIA se sont révélés un substrat de recherche idéal. Comme attendu, notre nouveau modèle propose des assertions inédites qui sont validées au cours de notre travail. Nous avons alors démontré que :

- 1/ Certains ateliers de conception favorisent simultanément robustesse et générativité. Nous qualifions cette nouvelle propriété d'«originalité acquise».
- 2/ Les modèles 3D dans le logiciel ne résultent pas d'un raffinement progressif de l'objet mais sont plutôt l'instanciation d'une base de règles paramétrée.
- 3/ Les designers industriels requièrent des outils distincts de ceux employés par les artistes 3D ou les ingénieurs, de par la nature de leur conception. Plus exactement, ces professionnels génèrent des modèles conceptuels selon une logique de singularité de masse.

Ces résultats offrent ainsi la perspective engageante de l'émergence d'une nouvelle génération d'outils numériques de conception. Ces outils inédits seront aptes à intégrer les designers industriels et à proposer de l'innovation à la demande.

Mots clés : Designer industriel, Conception, Créativité, Innovation, Outils numériques, Conception Assistée par Ordinateur (CAO), Réalité virtuelle, Dassault Systèmes, CATIA

Integration models for creative designers inside the industrial design process

ABSTRACT :

Many studies show that industrial design is key to triggering, fostering and sustaining innovation. However, the unique capacities of creation and innovation of industrial designers make it challenging for them to thrive within industrial environments.

The challenge for companies is to create the optimal work environment for those professionals, while ensuring their work can be integrated smoothly into the existing industrial design processes. We assume this dilemma is partially stemming from the intensive use of sequential design models in the industry. Design tools were developed on the assumption that creative front end and product development should be separated.

We introduce here a new model, aiming at depicting accurately the reasoning modes and the nature of the object being designed with the Computer Aided Design (CAD) suites. This model is the result of the joint mobilization of four academic fields : computer, cognitive and management science and design theories. Dassault Systèmes and their CATIA software have proven to be an excellent research environment for such questions. As we have been thinking, the new model (laminated) makes three new hypothesis. Those unheard assertions have been suggested and validated with this thesis :

- 1/ Some specific design workshops are able to provide simultaneously robust and generative design capacities. We call this characteristic «acquired originality».
- 2/ The object representations within by the software are not the result of successive refinements but derive directly from a parameterized set of rules.
- 3/ Industrial designers have specific requirements for CAD tools, different from their engineers and artists counterparts because what they design is fundamentally different. IDs generate conceptual models using a mass singularity technique.

Those results sketch the emergence of a new generation of CAD tools for industrial designers and able to foster innovation.

Keywords : Industrial design, Design, Creativity, Innovation, Digital tools, Computer Aided Design (CAD), Virtual reality, Dassault Systèmes, CATIA

Table des matières

I	Introduction, problématique et enjeux	13
1	Les designers industriels créatifs à méthode doivent être intégrés dans les processus industriels de conception	14
1.1	Les enjeux d'innovation et de renouvellement de l'identité des objets sont multiples	14
1.2	Les designers industriels disposent de méthodes de créativité reconnues	15
1.2.1	Les designers industriels sont identifiés comme particulièrement créatifs	15
1.2.2	Il existe une grande variété de méthodes favorisant la créativité	16
1.3	Les modalités d'intégration des designers industriels dans les processus industriels sont indéterminées	19
2	Une approche reposant sur les outils de la conception numérique pour les designers industriels créatifs	20
2.1	Les dimensions connexes à notre recherche doctorale qui ne seront pas traitées	20
2.2	Les processus de conception peuvent être enrichis par les capacités et méthodes des designers industriels	22
2.3	Une méthodologie qui exploite la richesse des outils numériques de conception	22
2.3.1	Pour intégrer les méthodes des designers industriels, la compréhension et l'analyse de leurs outils sont nécessaires	23
2.3.2	La littérature organisationnelle considère le sujet des outils comme ancien et opérationnel	24
2.3.3	Les outils des designers industriels sont un sujet brûlant de la littérature des outils numériques	25
2.3.4	Les outils numériques de conception produisent des données riches et exploitables pour la recherche académique	26

2.4	Le thème de recherche de ce travail doctoral	27
3	Un nouveau cadre analytique pour une modélisation affinée des processus de conception numérique	28
3.1	Introduction au modèle séquentiel	28
3.2	L'hégémonie des processus séquentiels dans la conception industrielle	29
3.2.1	Les avantages de ce modèle séquentiel pour l'industrie sont nombreux	29
3.2.2	Le processus séquentiel permet également une juxtaposition des phases créatives et de développement industriel .	29
3.2.3	Cette segmentation entraîne des critiques de la part des designers industriels	30
3.2.4	Le design gap est un épineux problème de la juxtaposition	30
3.3	Le modèle séquentiel se fonde sur certaines hypothèses simplificatrices	31
3.3.1	Hypothèse1	31
3.3.2	Hypothèse2	31
3.3.3	Hypothèse3	32
3.4	Un nouveau modèle est nécessaire, pour proposer des hypothèses différentes	32
4	Un cadre ainsi qu'une méthode de type recherche-intervention	33
4.1	Les théories de la conception fournissent un cadre théorique pour traiter des questions d'innovation	33
4.2	Dassault Systèmes est le partenaire idéal pour conduire des expérimentations	35
5	Résultats attendus	37
5.1	Partie II : Un nouveau modèle des outils numériques de conception	37
5.1.1	Problématique et enjeux	37
5.1.2	Méthodologie implémentée	38
5.2	Partie III : des ateliers capables de proposer simultanément robustesse et générativité	40
5.3	Partie IV : des processus de conception renouvelés qui exploitent la créativité des concepteurs	41
5.4	Partie V : de nouveaux outils numériques pour les designers industriels	41

II	Une nouvelle modélisation du processus de conception outillé	43
1	Problématique et enjeux	44
1.1	Les modèles dominants du processus de conception réalisent des simplifications implicites	44
1.2	L'hégémonie des processus séquentiels dans la conception industrielle	47
1.2.1	Les avantages de ce modèle séquentiel pour l'industrie sont nombreux	47
1.2.2	Le processus séquentiel opère également une juxtaposition des phases créatives et de développement industriel	48
1.2.3	La segmentation attire des critiques de la part des designers industriels	50
1.2.4	Le design gap est un épineux problème de la juxtaposition	51
1.3	Le modèle séquentiel est un cas particulier qui se fonde sur des hypothèses simplificatrices.	53
1.3.1	Première hypothèse	53
1.3.2	Seconde hypothèse	54
1.3.3	Troisième hypothèse	54
1.4	Un nouveau modèle est nécessaire pour considérer des hypothèses reformulées	55
2	Cadre et objectifs de ce travail	56
2.1	Objectifs	56
2.2	Cadre	56
3	Méthodologie	57
3.1	Quatre disciplines académiques pour l'étude des outils de conception numériques	58
3.1.1	Sciences informatiques	58
3.1.2	Sciences cognitives	66
3.1.3	Sciences de gestion	72
3.1.4	Théories de la conception	75
3.1.5	Synthèse	77
4	Résultats	78
4.1	Etude et modélisation des raisonnements de conception dans deux ateliers de conception numériques	78
4.1.1	Sélection et spécificités des ateliers numériques	78
4.1.2	Atelier CATIA Part Assembly et tâche de «compose»	83

4.1.3	Atelier CATIA Imagine & Shape	90
4.1.4	Synthèse	98
4.2	Élaboration du modèle stratifié	99
4.3	Validation du modèle stratifié	101
4.3.1	Atelier de sketching	101
4.3.2	Atelier de formation à la créativité du Bauhaus	104
4.3.3	Synthèse	112
4.4	Proposition d’hypothèses alternatives	114
4.4.1	Première hypothèse alternative	114
4.4.2	Seconde hypothèse alternative	115
4.4.3	Troisième hypothèse alternative	115
4.5	Résultats industriels	117
4.5.1	Une plateforme générique	118
4.5.2	Trois brevets en cours de dépôt	119

III Des ateliers de conception aux capacités renouvelées grâce à l’originalité acquise 122

1	Contexte de l’article «Solving the dilemma between robustness and generativeness : the use of new design software at the design gap» par rapport à notre travail de thèse	123
2	Résumé de l’article «Solving the dilemma between robustness and generativeness : the use of new design software at the design gap»	125
2.1	Problématique et enjeux	125
2.2	Méthodologie implémentée	126
2.3	Résultats principaux	126
2.3.1	Résultats académiques	126
2.3.2	Résultats industriels	127
3	Article 1 :Solving the dilemma between robustness and generativeness : the use of new design software at the design gap	128

IV Des processus de conception renouvelés par des ateliers innovants : vers un changement de perspective sur la nature de la conception 146

1	Contexte de l’article «Managing radical innovation as an innovative design process» par rapport à la thèse	147
----------	---	------------

2	Résumé de l'article «Managing radical innovation as an innovative design process»	149
2.1	Problématique et enjeux	149
2.2	Méthodologie opérée	150
2.3	Résultats principaux	150
2.3.1	Résultats académiques	150
2.3.2	Résultats industriels	151
3	Article 2 : Managing radical innovation as an innovative design process	153

V Les raisonnements de conception des designers industriels : des modèles conceptuels pour atteindre la singularité de masse 178

1	Contexte de l'article «Towards a theory for managing creative industrial CAD tools : dealing with mass singularity and the design of conceptual models» par rapport à la thèse	179
2	Résumé de l'article «Towards a theory for managing creative industrial CAD tools : dealing with mass singularity and the design of conceptual models»	181
2.1	Problématique et enjeux	181
2.2	Méthodologie implémentée	182
2.3	Résultats principaux	182
2.3.1	Résultats académiques	182
2.3.2	Résultats industriels	183
3	Article 3 : Towards a theory for managing creative industrial CAD tools : dealing with mass singularity and the design of conceptual models	186

VI Conclusions 216

1	Résultats académiques	217
1.1	Des ateliers spécifiques de conception favorisent simultanément robustesse et générativité	217
1.2	Les avatars dans le logiciel ne sont pas le résultat d'un raffinement progressif de l'objet	218

1.3 Les designers industriels nécessitent des outils différents de ceux des artistes 3D et des ingénieurs	218
2 Les résultats et implications industriels	220
3 Apport de la thèse sur le plan personnel	222
4 Remerciements	224
 VII Annexe	 226
 VIII Bibliographie	 249

Première partie

Introduction,
problématique et enjeux

Chapitre 1

Les designers industriels créatifs à méthode doivent être intégrés dans les processus industriels de conception

1.1 Les enjeux d'innovation et de renouvellement de l'identité des objets sont multiples

Les sociétés de l'industrie manufacturière réalisent la plupart de leurs profits en vendant des produits ayant moins de trois ans d'existence. Une des conséquences de ce rythme d'innovation intensif est le besoin d'une capacité d'innovation répétée, soit par le renouvellement constant de produits existants, soit par la création de nouveaux ([66]). Après une décennie de développement principalement concentrée sur des extensions de produits et l'obtention de succès rapides, la quête de « l'idée de génie », ou de l'innovation de rupture est devenue un besoin vital de gestion ([23]). La multiplication de produits aux capacités jusqu'alors inconnues (comme l'iPhone en 2007 représenté en Fig.1.1) et introduisant de nouvelles interfaces suscite une demande sociale croissante pour des innovations capables d'intégrer des impératifs d'ergonomie, d'usage, et d'expérience utilisateur. Gérer ce type d'innovation requiert des capacités, des processus et des outils spécifiques afin de garantir que celle-ci ne restera pas « orpheline » ([2]).



FIGURE 1.1 – L'iPhone en 2007, une innovation radicale.

1.2 Les designers industriels disposent de méthodes de créativité reconnues

1.2.1 Les designers industriels sont identifiés comme particulièrement créatifs

En parallèle, un grand nombre d'études académiques souligne le fait que, au sein de contextes créatifs, le design industriel est essentiel pour déclencher, nourrir et soutenir l'innovation ([79, 111]). Berkowitz ([5]) indique également que le design industriel contribue à la performance des sociétés de manière mesurable. Les compagnies investissent de plus en plus dans le design et impliquent des agences spécialisées en innovation dans leurs processus de conception ([83]). Les journaux académiques publient de nombreux articles qui explorent les contributions du design au développement de produits et à la performance des entreprises ([41, 53]). Le Journal of Product Innovation Management, a consacré deux «special issues» à l'étude de la relation entre design industriel et innovation de produit, et en particulier aux interactions entre marketing et design ([56, 57]).

Cependant, selon une citation de Steve Jobs dans Business Week, la créativité reposerait seulement sur la capacité à mettre des connaissances en connexion. En effet, *«lorsque vous demandez à des gens créatifs comment ils ont fait telle ou telle chose, ils se sentent un peu coupables parce qu'ils n'ont pas vraiment*

fait quelque chose, [ils ont simplement] été capables de connecter des expériences qu'ils ont eues et de les synthétiser sous une nouvelle forme». Si la créativité est un simple coup de chance, comment la rendre accessible ?

Afin de parvenir à innover, les entreprises désireuses de s'arroger les compétences de concepteurs créatifs ont essentiellement recours à deux solutions. D'un côté, se sont développés de nombreux séminaires, ateliers ou formations proposant l'acquisition rapide de certaines des méthodes utilisées par des grandes figures de l'innovation. D'un autre côté, les designers industriels étant aussi identifiés comme créatifs, il paraît souhaitable de pouvoir les intégrer au sein des équipes de recherche et développement afin qu'ils participent au processus de conception et augmentent ses capacités d'innovation. Les designers industriels possèdent en effet des méthodes spécifiques qui les conduisent à produire des innovations. Toutefois, une telle réussite est conditionnée par un aménagement des conditions de travail de ces professionnels au sein d'un environnement approprié (terme que nous préciserons plus amplement dans la suite de ce manuscrit).

Par ailleurs, les deux cas indiqués précédemment révèlent une information cruciale : l'accès à l'innovation repose ainsi sur des méthodes particulières. Quelles sont donc les méthodes qui permettent d'être créatif en milieu industriel ?

1.2.2 Il existe une grande variété de méthodes favorisant la créativité

Derrière le «mythe» de la créativité, la littérature identifie plus précisément une multiplicité de techniques. Cependant, précisons dès à présent qu'une gageure décisive est que ces techniques ne semblent pas pouvoir se plier à tous les processus, surtout lorsque ceux-ci sont industriels. Certains chercheurs ([24]) indiquent ainsi que les problèmes de conception sont distincts de ceux rencontrés par les scientifiques, mathématiciens ou chercheurs. Ces problèmes ont des particularités spécifiques qui les rendent mal définis et structurés, voire même mal posés ([88]).

Toutefois, ces analyses ne sont pas partagées par l'ensemble de la communauté s'intéressant à ces questions. Citons notamment Verganti (2009) qui indique qu'il est possible de traiter la conception avec une méthodologie similaire à celle des autres disciplines scientifiques. En parallèle, des efforts significatifs ont été opérés par la littérature récente en matière de conception concentrée sur la recherche d'une approche spécifique au design industriel généralement appelée « design centré sur les usages » ([110, 19, 113]). Cette approche, sous le feu des projecteurs, particulièrement grâce au succès d'agences de design majeures, telles que IDEO ([60]) ou Continuum ([71]), implique que la conception de tout produit doit être initiée par une phase détaillée d'analyse des besoins des clients.

Brown ([14]) suggère que le « design thinking » est une méthode qui réunit de façon transverse l'intégralité des types d'innovation avec une philosophie basée sur le « human centered design ». Cet article propose une décomposition du processus de conception en trois phases, « inspiration », « ideation » et « implémentation ». Selon Dym et al. ([33]), plusieurs dimensions du « design thinking » expliquent pourquoi la conception est difficile à apprendre et à enseigner. Ces difficultés étaient déjà au centre des préoccupations lorsqu'il s'agissait de déterminer quels devaient être les enseignements de l'école du Bauhaus qui est souvent considérée comme la première école de design industriel au monde ([32]). Des débats similaires ont agité l'école d'ULM ([6]). Bien plus, pour Buxton ([16]), un processus de conception idéalisé serait « une trahison » car il serait non seulement d'une valeur médiocre, mais également difficilement descriptible. Cette troublante conclusion ne l'empêche pas de proposer que la phase de conception créative doit être achevée avant de commencer celle d'ingénierie, et de suggérer un processus de conception accessible dans sa globalité aux designers industriels. Dans son livre, il ajoute que l'activité archétypale de la conception est le « sketching », qui donne accès au « design thinking » mais également à l'apprentissage de la conception.

D'un autre côté, Norman et Verganti ([82]) indiquent que la conception centrée sur l'utilisateur est principalement adaptée à l'innovation incrémentale mais conduit rarement à des innovations radicales. Selon leurs résultats, l'innovation radicale provient principalement de changements de technologie ou d'identité de l'objet, la seconde étant une des capacités prêtée aux designers industriels. Verganti ([111]) identifie ainsi la conception basée sur le renouvellement de l'identité de l'objet qu'il nomme « design meaning ». Hatchuel ([51]) distingue également opérations de « pointe » pour lesquelles l'identité de l'objet est radicalement modifiée, et opérations de « parure » lorsque le design industriel se contente d'ajouter des éléments à l'objet. La Figure 1.2 représente à ce titre un bon exemple de « pointe ».

Par ailleurs, d'autres chercheurs proposent la conception des dimensions sensibles et émotionnelles des objets comme constituants essentiels à tout cahier des charges. Le Kansei design suggère d'analyser les besoins des utilisateurs en termes de perception pour les transcrire en éléments de conception tangibles ([9]). Cette méthode associe, au sein d'éléments techniques appartenant au cahier des charges, des dimensions de l'ordre de la psychologie des utilisateurs. Il s'agit d'une forme d'intégration qui offre des phases de génération et d'évaluation qui s'articulent lors de phases de conception successives ([81]).

Enfin, de grands succès industriels sont souvent érigés en exemple pour leur



FIGURE 1.2 – « Chairless » de Vitra, une nouvelle chaise qui n'est pas une chaise. Il s'agit d'une opération de « pointe » au sens d'Hatchuel (2013).

capacité à avoir réussi à capter des besoins des clients (exprimés ou non) et à les avoir incarnés dans un produit à l'expérience utilisateur réussie. Citons Apple et son designer star Jonathan Ive qui ont su créer une nouvelle identité pour l'ordinateur personnel, l'iMac contribuant ainsi à la survie de l'entreprise ([26]). Dans son étude, Betts ([6]) décrit les conditions de création de l'école ULM couramment appelée le « nouveau Bauhaus ». Il explique que Maldonado, un des théoriciens du contenu éducatif de cette école, va même jusqu'à renier l'aspect esthétique du design industriel. Maldonado explique que cette obsession détourne la vraie vocation du design en se concentrant uniquement sur un « culte pathologique de la différenciation qui ne servirait qu'à flatter les instincts des consommateurs » ([75]). Il insiste pour rapporter que le design industriel n'est pas un art et que les designers industriels ne sont pas des artistes. Selon lui, ils interviennent au centre même de la civilisation industrielle et sont des experts des sciences et techniques en étant capables d'interpréter les plus secrètes et subtiles dimensions culturelles ([6]).

Alors que tant de techniques et de méthodes existent, comment les intégrer efficacement dans les processus industriels sans dégrader leur principal atout, la créativité qu'elles permettent ?

1.3 Les modalités d'intégration des designers industriels dans les processus industriels sont indéterminées

Les moyens à mettre en œuvre pour intégrer les designers industriels restent obscurs et les solutions actuellement proposées sont limitées. Historiquement, les designers industriels ont toujours été difficiles à intégrer dans le processus de conception industriel standardisé des ingénieurs, et ce dès l'apparition de la profession ([70]). En effet, les designers industriels sont encore considérés comme incompris et mystérieux ([98]). Leur collaboration avec les autres professions de concepteurs, tels que les gestionnaires de projets et les ingénieurs est notamment complexifiée par de fortes différences de langage de conception ([114, 76]). La fin ainsi que les moyens que les designers industriels mobilisent pour réaliser ce qu'ils considèrent comme une conception réussie et le type d'innovation qu'ils visent sont également très variés des autres concepteurs ([86, 76]).

Se pose ainsi une première question de recherche, comment faire pour intégrer les designers industriels ainsi que leurs méthodes de création sans dégrader leur performance en innovation ?

Chapitre 2

Une approche reposant sur les outils de la conception numérique pour les designers industriels créatifs

Nous orientons notre étude sur les designers industriels. Ces professionnels disposent de méthodes difficilement caractérisables qui rendent leur intégration compliquée. Nous allons maintenant préciser quels seront le champ et le périmètre délimitant notre travail.

2.1 Les dimensions connexes à notre recherche doctorale qui ne seront pas traitées

Afin de traiter la question de l'intégration des designers industriels, nous concentrons notre étude des outils numériques employés au cours des processus de conception. Cette intégration complexe, et dans un contexte plus large de l'assimilation de concepteurs créatifs, est rendue difficile par la confusion des activités et des débats sur les professions. Il faut bien noter que nous optons pour l'étude de l'intégration des designers industriels dans les processus de conception industrielle. Cependant, il ne s'agit pas d'une thèse sur la profession de designer industriel. En effet, depuis quinze ans, les entreprises industrielles tentent de les intégrer sans succès dans les suites de conception numériques. Nous estimons qu'une nouvelle approche orientée outils est pertinente. Il s'agit donc pour nous de ne pas :

> Traiter la problématique de l'intégration par la voie professionnelle. Cette approche est centrée sur la structuration de la profession des designers industriels et la place qui doit leur être attribuée dans les processus de conception. Nous

ne nous pencherons pas non plus sur une définition de cette profession par ses périmètres d'action, comme c'est parfois le cas au sein de la littérature, lorsque les designers industriels sont identifiés comme spécialisés dans les usages, l'ergonomie ou encore l'apparence des produits qu'ils conçoivent.

> Sonder la complexité de cette profession multi-facette de designers au sens français du terme. Des dizaines de formations, écoles et spécialités coexistent sous des appellations très proches, recouvrant des activités diverses évoluant régulièrement. Nous ne décortiquerons pas les différentes formations qui sont ainsi proposées ainsi que le détail des enseignements offerts. Les designers appartenant aux catégories graphistes et artistiques ne seront pas traités.

> Analyser les concepteurs créatifs ayant d'autres méthodes, tels que les ingénieurs, les artistes 3D ou les architectes. Ces autres professions disposent elles aussi de méthodes, formations et outils spécifiques qui ne sont pas inclus dans l'étude proposée au sein de cette thèse.

> Evoquer les concepteurs créatifs n'ayant pas de méthode établie. Ces concepteurs appartenant au milieu artistique sont parfois comparés à des designers industriels « stars ». En effet, ils modifient drastiquement les organisations dans lesquelles ils interviennent ponctuellement en imposant leurs méthodes, sans se préoccuper d'une éventuelle intégration. La Figure 2.1 est un sketch de Franck Gerhy. Son interprétation est pour le moins subjective.

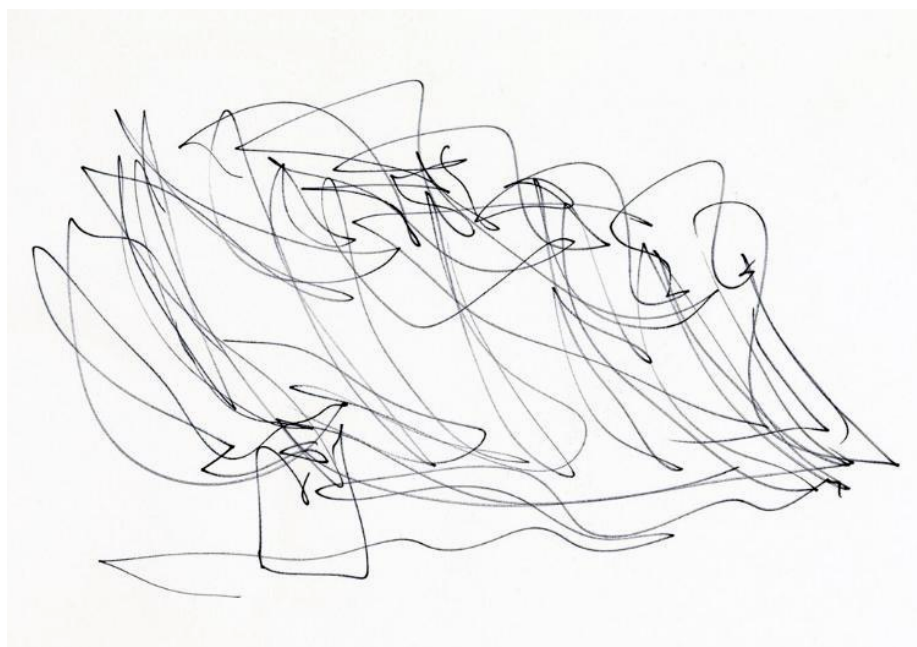


FIGURE 2.1 – Un sketch de Franck Gerhy préfigurant la fondation Cartier à Paris.

2.2 Les processus de conception peuvent être enrichis par les capacités et méthodes des designers industriels

Le type de créativité et d'innovation qui nous préoccupe et que nous nous proposons d'étudier au cours de ce travail doctoral. Il s'agit de l'aptitude à modifier l'identité des objets ou à en inventer des inédites ([111, 51]). Les designers industriels revendiquent ce savoir-faire spécifique ainsi que les méthodes pour y parvenir. Nous allons discerner les phases lors desquelles les designers industriels sont les plus créatifs. Celles-ci seront identifiées par un suivi de leurs modes d'actions et la mobilisation de méthodes spécifiques de conception pour atteindre un résultat qui concerne une modification de l'identité de l'objet. Selon Norman et Verganti ([82]), seul un travail sur la technologie ou la signification renvoyée par le produit produisent des innovations radicales. Dans ce cadre, et en considérant que les designers industriels ne sont pas des experts des technologies, et ce contrairement à leurs collègues ingénieurs, nous nous concentrons sur la conception visant à réviser l'identité des objets. Hatchuel ([51]) identifie cette tendance et l'explique de la manière suivante : « En prenant en compte les contextes sociaux et cognitifs, il [le designer industriel] identifie le dilemme qui est spécifique au design industriel. Ce dilemme peut être résolu de deux façons, appelées « parure » et « pointe » qui diffèrent en fonction de leur façon d'impacter l'identité des objets, en la maintenant ou en la modifiant. ». Selon lui, la combinaison de la parure et de la pointe justifie le pouvoir génératif des designers industriels ainsi que leur situation paradoxale, à savoir, ni ingénieurs, ni artistes ([51]). Cette capacité des designers industriels à réinventer l'identité des objets et à susciter des innovations radicales est pour nous essentielle. En effet, ce type de performances nécessite l'emploi d'outils adaptés à leurs modes de raisonnement et de conception. C'est pour cette raison que l'angle des outils nous apparaît judicieux.

L'enjeu de la thèse est ainsi de proposer des modèles outillés pour l'intégration des concepteurs créatifs disposant de techniques et méthodes.

2.3 Une méthodologie qui exploite la richesse des outils numériques de conception

Nous nous intéresserons ici à l'intégration de la créativité dans les processus industriels. Ces processus sont aujourd'hui massivement outillés, certains

produits ne pouvant pas être conçus sans outils numériques.

2.3.1 Pour intégrer les méthodes des designers industriels, la compréhension et l'analyse de leurs outils sont nécessaires

Lorsque les designers industriels mobilisent leurs méthodes, ils se reposent sur des outils afin de les appliquer. Or, l'environnement industriel est actuellement dominé par les ingénieurs et des outils numériques qui sont conçus par et pour eux ([16, 3]). Comment est-il possible d'exploiter de tels outils existants ? Est-il nécessaire de créer des nouveaux outils à partir d'une page blanche ou de sélectionner une voie hybride ?

L'émergence d'outils dédiés aux besoins des concepteurs créatifs est capitale. Ces derniers les considèrent comme intrinsèques à leurs capacités créatives.

« For me, it is about inspiration coming from the tools themselves » Przemek-Truscinski.

De tels ressources sont le lieu d'incarnation de leurs méthodes et conditionnent leurs capacités d'action, comme le sketch illustré en Figure 2.2.

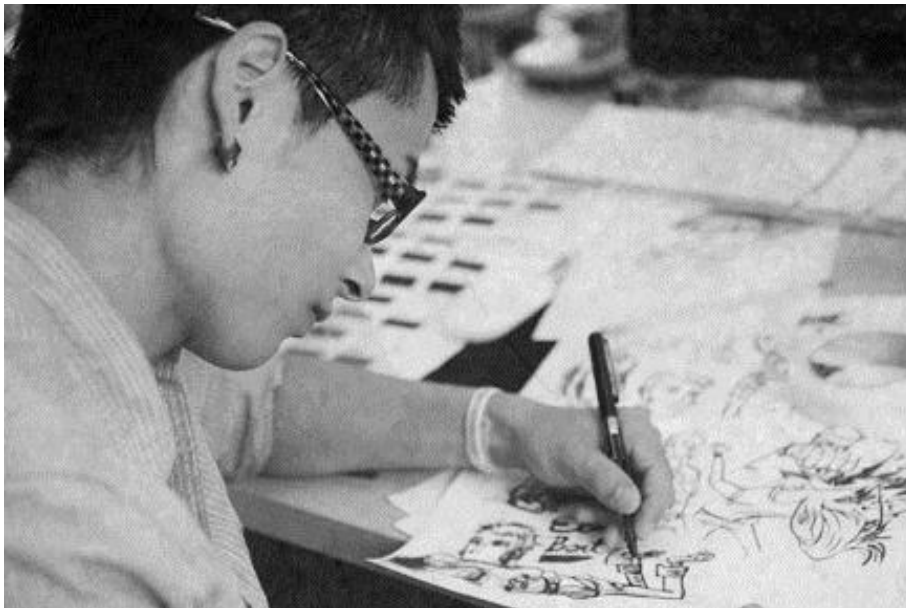


FIGURE 2.2 – Un designer industriel en train de sketcher.

Aujourd'hui, les processus industriels de conception se déroulent massivement *via* des suites logicielles de conception numériques qui sont devenues indispensables pour la réalisation de la quasi-totalité des produits manufacturés.

Ces processus de conception orchestrent des professions, des connaissances et des techniques variées grâce à des outils informatiques puissants qui garantissent le contrôle, la qualité, ainsi que la maturation des concepts au cours de leur développement ([91]). La diffusion de ces outils a été facilitée par la démocratisation des ordinateurs associée au phénoménal accroissement de leurs performances ([11]). La tendance actuelle est orientée vers une généralisation accélérée de l'utilisation de tels outils, pour l'ensemble des industries, et pour la totalité des phases du processus de conception. La puissance des suites de conception Product Lifecycle Management (PLM) et Product Data Management (PDM) permet de gérer numériquement des étapes clés telles que la conception d'usines, la commande de matière premières ou encore la gestion de la maintenance du produit au sein d'un unique environnement logiciel ([27, 105]). C'est justement parce que les concepteurs avec lesquels ils doivent collaborer (ingénieurs, gestionnaires de projets et spécialistes en marketing notamment) sont déjà massivement équipés par ce type d'outils numériques que le problème de l'intégration des designers industriels se pose.

Par ailleurs, d'autres classes de concepteurs, fortement créatifs dans l'industrie du divertissement, disposent d'ores et déjà de suites logicielles puissantes assurant leur intégration. Ils disposent d'un large choix de solutions de conception numériques et conçoivent de manière efficace et créative au sein de processus industriels spécifiques. Cet exemple prouve qu'il est donc possible de trouver une solution à l'intégration des designers industriels par la voie des outils.

2.3.2 La littérature organisationnelle considère le sujet des outils comme ancien et opérationnel

De nombreux exemples au sein de la littérature foisonnent, prouvant que l'utilisation d'outils comme moyen d'intégration de concepteurs est une recette éprouvée.

Au sein des théories de l'organisation, la mobilisation des outils se présente comme une stratégie intéressante couramment utilisée dans les sciences de gestion ([78]). De Vaujany ([28]) s'inspire d'une perspective sur les outils pour étudier les évolutions des organisations. Les outils rapportent finement les interactions entre utilisateurs et technique. A ce propos, rappelons que le recrutement d'ingénieurs au sein des bureaux d'études, au cœur des entreprises, fut notamment permise par des outils spécifiques, les planches à dessins, visibles dans la figure 2.3. Il s'agit d'un effort de domestication de la conception qui est dépendant de la structuration ainsi que de l'organisation de la conception réglée selon les travaux de Le Masson et al. ([68]).



FIGURE 2.3 – Un bureau d'études automobile en 1950.

L'intégration de la recherche avancée a été également opérée par l'intermédiaire de laboratoires outillés. Nous pouvons citer comme exemple la société Schlumberger. Son ascension progressive en tant qu'entreprise industrielle est directement liée à la découverte ainsi qu'à la mobilisation d'instruments innovants qui mesurent des grandeurs physiques spécifiques telles que la porosité ou la résistance ([10]). Enfin, les outils numériques de conception autorisent la collaboration entre divers métiers ([85]). Une telle collaboration peut être incarnée autour d'un modèle numérique partagé auquel tous contribuent ([27]).

2.3.3 Les outils des designers industriels sont un sujet brûlant de la littérature des outils numériques

Parmi les nombreuses tentatives effectuées pour intégrer les designers industriels, les outils sont une voie privilégiée de la littérature académique et de l'industrie. Pourtant, les outils numériques actuels qui sont proposés aux designers industriels ne leur conviennent pas. Ce constat est régulièrement répété dans la littérature ([106, 107]) reprochant l'impact négatif sur la créativité et l'inaptitude à traiter les phases amont de la conception des outils numériques disponibles. Leurs lacunes en termes d'interfaces, qui conditionnent leurs interactions avec les représentations de l'objet en cours de conception, sont fréquemment mises en évidence. En parallèle, les designers industriels disposent d'outils qui se sont développés de manière autonome et qui semblent incompatibles avec le reste du processus. En effet, les outils spécifiques des designers industriels re-

posent principalement sur des médias traditionnels tels que le «clay modeling» ou le «sketching». Les designers industriels tentent alors d'intégrer le processus numérique en empruntant à d'autres concepteurs leurs outils. La Figure 2.4 illustre ainsi deux représentations du même concept.

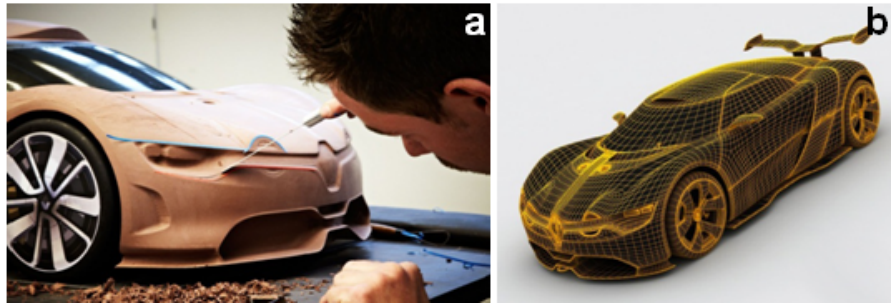


FIGURE 2.4 – Modèle de Renault Alpine. (a) «Clay model». (b) Modèle 3D.

Par ailleurs, lorsqu'il s'agit d'outils dédiés aux ingénieurs, les designers industriels voient leur créativité dégradée. Bien plus, lorsqu'ils empruntent ces outils numériques aux artistes 3D, ils ne sont pas capables de surpasser les problèmes de conversion et de compatibilité, ceci garantissant certes leur créativité mais pas leur intégration. Cette phase de changement de média est symptomatiquement identifiée comme problématique et a été définie sous le nom de «design gap» ([118]).

2.3.4 Les outils numériques de conception produisent des données riches et exploitables pour la recherche académique

Les outils numériques de conception, également appelés outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) génèrent une base de données riche et détaillée lors de leur utilisation. Cette base de données contient certes les essais, tentatives, échanges et schémas de construction mais sauvegarde également les actions élémentaires de l'utilisateur. Elle est organisée et supporte les échanges entre concepteurs. L'étude d'une telle structure permet d'une part d'effectuer un suivi de la production et de la gestion des connaissances du processus de conception et d'autre part, de définir une stratégie expérimentale. Les outils assurent ainsi au chercheur l'accès direct à l'activité du concepteur sans biais lié à d'éventuelles interprétations ou médiations.

2.4 Le thème de recherche de ce travail doctoral

Après avoir défini les enjeux auxquels nous souhaitons répondre, nous délimitons le périmètre d'étude ainsi que l'angle que nous mobiliserons au cours de ce travail doctoral. Nous analyserons donc ici par une approche des outils numériques l'intégration des méthodes développées par les designers industriels créatifs au cours des processus de conception.

Chapitre 3

Un nouveau cadre analytique pour une modélisation affinée des processus de conception numérique

Nous proposons une démarche inédite pour l'intégration des designers industriels créatifs. Comme déjà évoqué, nous supposons que leur intégration est problématique pour des raisons en partie liées à une modélisation du processus de conception industriel reposant sur des hypothèses simplificatrices. Cette modélisation entraîne un biais dans la proposition d'outils numériques de conception pour les designers industriels et une grande difficulté à répondre à leurs besoins. Pallier à cette limitation suppose alors une capacité à modifier les processus de conception afin de les enrichir. Nous allons ainsi établir un nouveau modèle qui étayera notre démonstration.

3.1 Introduction au modèle séquentiel

S'il existe divers modèles dans la littérature, des formes de représentations assez similaires au «Stage Gate», se retrouvent dans l'industrie lorsqu'il s'agit de modéliser le «New Product Development» (NPD) ([22, 23]). Cette modélisation du processus représente la conception comme une succession d'étapes visant chacune à améliorer la définition du produit en cours de conception. Ces étapes identifiées doivent s'enchaîner pour échanger des degrés de liberté de conception contre de la connaissance sur le produit, ce qui conduit à progressivement réduire les incertitudes. La conception s'achève lorsque tous les degrés de liberté ont été

épuisés et les incertitudes levées.

Cette modélisation du processus est souvent présentée sous une forme séquentielle correspondant à la Figure 3.1.

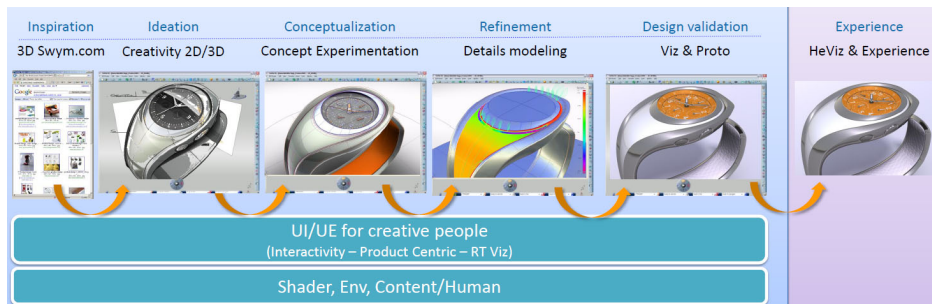


FIGURE 3.1 – Modélisation du processus de conception servant supportant la conception d'outils numériques.

Ce processus mobilise séquentiellement des outils de CAO, ou des sous-parties d'outils qualifiées d'ateliers, permettant de produire successivement une représentation de plus en plus précise du futur objet, appelée maquette numérique. Nous l'appellerons processus séquentiel dans la suite de notre travail.

3.2 L'hégémonie des processus séquentiels dans la conception industrielle

3.2.1 Les avantages de ce modèle séquentiel pour l'industrie sont nombreux

L'utilisation de cette modélisation du processus de type séquentiel a permis et permet encore de répondre à un certain nombre d'attentes des entreprises et des concepteurs qu'elles emploient ([67, 68]). De plus, il a été la prémisse à la conception d'outils adaptés à chacune des phases identifiées, ce qui comporte des avantages supplémentaires. Nous les détaillerons dans la partie II de ce document.

3.2.2 Le processus séquentiel permet également une juxtaposition des phases créatives et de développement industriel

Comme un tel processus de conception comportait un grand nombre d'avantages, il a été très largement diffusé et s'est imposé. En effet, sous sa forme

séquentielle il permet d'ajouter à la demande des étapes supplémentaires. Traditionnellement, ce type de modèle estime que degrés de liberté et connaissance du produit sont deux valeurs opposées. Une phase consacrée à la créativité s'est naturellement imposée en phase amont du processus, que nous appelons «creative front end». Un tel mode d'intégration par juxtaposition ne modifie pas les processus de développement déjà standardisés et offre un espace d'exploration sensé favoriser l'innovation. Il est ainsi possible de décomposer créativité et développement produit en les traitant comme deux phases distinctes.

3.2.3 Cette segmentation entraîne des critiques de la part des designers industriels

Les designers industriels ne se satisfont pourtant pas de cette méthode d'intégration pour plusieurs raisons ([16]). Tout d'abord, ils prescrivent usuellement les spécifications des produits qu'ils conçoivent, et notamment les dimensions extérieures et souhaitent intervenir tout au long du processus afin que leur conception initiale ne soit pas trahie ([106, 107]). Lorsqu'ils s'expriment lors de phases de «creative front end», ils opèrent généralement en mobilisant des médias de conception traditionnels tels que le maquettage, «clay modeling» ou encore le «sketching» ([34, 35]). Ces médias, qui permettent des explorations intensives et qui favorisent la créativité, possèdent l'avantage de fournir plutôt un moyen de suggestion et d'exploration que de prescription spécifique. De plus, ces média comportent une large part d'ambiguïté et fournissent peu de détails. Ces atouts se transforment en contrainte dès lors qu'il s'agit de les transmettre à d'autres concepteurs. En compartimentant la créativité et en limitant l'intervention des designers industriels aux phases amont du processus, il existe un fort risque de mauvaise interprétation ou de simplification de leur concept initial, ce qu'ils vivent alors comme une trahison.

Ajoutons qu'il est également courant que des impératifs de développement spécifiques tels que des délais très courts ou l'obligation d'utiliser une technologie particulière, surviennent. Il est alors demandé aux designers industriels d'intervenir sur des objets quasiment entièrement conçus. Au cours de telles situations, les phases créatives sont généralement les premières à être sacrifiées. Les designers industriels s'accommodent très mal de ces interventions tardives et comparent cette sollicitation à de « l'habillage de bossu » ([70]).

3.2.4 Le design gap est un épineux problème de la juxtaposition

L'usage du processus séquentiel, ainsi que son mode d'intégration de la créativité par juxtaposition, pose un problème supplémentaire dont les solutions

sont ardemment débattues dans la littérature des outils numériques de conception. Lorsque les concepteurs passent des phases amont créatives aux phases de développement produit, ils rencontrent un «design gap» ([106, 107, 4]). Ce dernier est défini comme une “incapacité pour les concepteurs de disposer d’outils numériques pour effectuer les premières étapes de la conceptualisation du futur produit” ([118]).

Les concepteurs d’outils sont depuis longtemps à l’œuvre sur cette problématique. Les chercheurs en sciences informatiques réfléchissent par exemple à produire des ressources capables d’une telle transition, entre créativité intensive et développement industriel sans perte. Toutefois, ces tentatives se sont pour le moment soldées par des prototypes aux propriétés prometteuses mais qui n’ont toujours pas été concrètement intégrés aux suites de conception industrielles numériques.

3.3 Le modèle séquentiel se fonde sur certaines hypothèses simplificatrices

Ce modèle de processus séquentiel est omniprésent et incontournable. Cependant, nous doutons de sa validité quant à l’intégration de designers industriels créatifs pour obtenir des innovations radicales. Nous employons un vocabulaire issu des théories de la conception ([50]) pour qualifier les conceptions selon deux dimensions. La première est leur générativité qui traduit la capacité à proposer des alternatives originales. La seconde dimension est la robustesse qui est correspond à la capacité à produire des variantes qui résistent aux variations de contexte. Nous montrons que le modèle séquentiel reste obscur et recèle un grand nombre d’hypothèses simplificatrices (dont résultent pourtant également ses nombreux avantages). Parmi ces hypothèses, nous identifions spécifiquement les assertions suivantes qui nous semblent essentielles :

3.3.1 Hypothèse1

Les ateliers de conception réalisent systématiquement un échange entre Robustesse et Générativité de la conception.

3.3.2 Hypothèse2

Les avatars, multiples représentations de l’objet en cours de conception dans la suite numérique, sont le résultat de couches successives qui correspondent à un raffinement progressif de l’objet.

3.3.3 Hypothèse3

La logique d'accumulation des connaissances durant la conception est une logique de sélection ou des paramètres sont successivement instanciés. Au sein de cette logique, se succèdent accumulation, sélection et validation.

Comme le modèle séquentiel ne propose d'intégrer la créativité que durant les phases amont, nous suggérons de développer un modèle plus performant. Ce dernier nous permettra de reformuler ces hypothèses et d'élaborer un nouveau processus de conception capable d'intégrer plus efficacement la créativité des designers industriels.

3.4 Un nouveau modèle est nécessaire, pour proposer des hypothèses différentes

Nous proposons à présent d'établir un nouveau modèle d'intégration pour les concepteurs créatifs à méthode en sélectionnant la voie des outils. Ce modèle inédit devra proposer d'intégrer les designers industriels, tout en autorisant la génération d'outils numériques adaptés. Pour ce faire, nous concevrons un modèle d'activité des designers créatifs qui nous renseignera quant aux autres concepteurs créatifs à méthode.

Chapitre 4

Un cadre ainsi qu’une méthode de type recherche-intervention

De par leurs propriétés intrinsèques, les outils numériques de conception proposent de nombreux observables qui permettent d’accéder par la suite aux raisonnements de conception. En fonction des hypothèses posées et des résultats recherchés, nous mobiliserons des méthodes spécifiques telles que des études de cas, des perspectives historiques et des expérimentations calibrées sur mesure. Nous recourrons également à un cadre de recherche théorique large capable de caractériser l’innovation afin de ne pas établir des hypothèses simplificatrices sur la modélisation des processus.

4.1 Les théories de la conception fournissent un cadre théorique pour traiter des questions d’innovation

Fondé en 1967, le Centre de Gestion Scientifique (CGS) est un laboratoire pionnier dans le domaine des Sciences de Gestion. Cette unité se concentre notamment sur les activités de conception, les capacités d’innovation dans les entreprises ainsi que le système productif mondial. Le CGS a une stratégie de modélisation forte et propose une théorie de la conception apte à fournir un cadre pour l’étude de conceptions radicalement innovantes.

Depuis 1998, les chercheurs du CGS ont introduit l’hypothèse que la compétition mondiale se caractérisait par un régime «d’innovation intensive». Cette hypothèse, largement confirmée ensuite, signalait à la fois l’élargissement des stratégies d’innovation au-delà du domaine classique de la Recherche et Déve-

loppement (R&D) et l'accélération des ruptures dans «l'identité des objets et des techniques». Dans ce cadre, la recherche académique donne accès à l'élaboration de nouveaux modèles théoriques ainsi qu'instrumentaux des activités de conception.

Les chercheurs du CGS disposent ainsi de théories (notamment la théorie CK illustrée en Figure 4.1) permettant de rendre compte des exercices de conceptions radicales et innovantes qui caractérisent compte d'une large variété d'activités et de concepteurs. Le cadre théorique, que ces chercheurs mobilisent, possède une capacité revendiquée de traiter du changement d'identité de l'objet modélisé, et ce indépendamment des professions, en se focalisant la modélisation du raisonnement de conception. De telles études montrent qu'une des caractéristiques principale des théories de la conception est de se concentrer sur un type particulier d'innovation, de spécifier les effets de fixation à surmonter et de donner des modèles associés pour y parvenir.

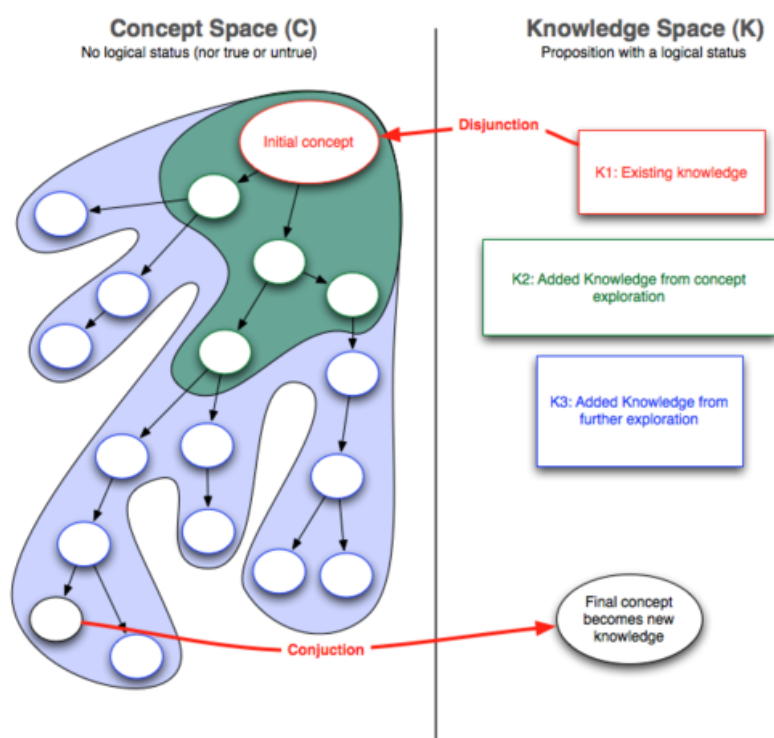


FIGURE 4.1 – La théorie Concept-Knowledge permet de concevoir dans l'inconnu ([47, 49]).

Du fait de ses résultats académiques et de ses méthodes établies sur de la recherche-intervention, le CGS apparaît comme le lieu d'étude privilégié pour

notre recherche doctorale.

4.2 Dassault Systèmes est le partenaire idéal pour conduire des expérimentations

Dassault Systèmes est une filiale du groupe Dassault créée en 1981 par la Société des Avions Marcel Dassault afin de développer de nouvelles générations du logiciel de CAO CATIA. Dassault Systèmes est le leader mondial des logiciels de conception numérique en 3D, des outils pour la maquette numérique 3D et des solutions pour la gestion du cycle de vie d'un produit PLM/PDM. La Figure 4.2 est l'image d'un Boeing 777, un avion conçu grâce aux outils numériques.



FIGURE 4.2 – Le Boeing 777 est le premier avion conçu entièrement numériquement grâce à CATIA.

Cette «pépité» française développe, teste et commercialise les outils numériques de conception du futur sur la base de sa suite logicielle CATIA. A ce titre, Dassault Systèmes est un terrain d'étude extrêmement fécond pour nos recherches :

>Dassault Systèmes participe remarquablement à l'intégration des concepteurs dans un environnement numérique de conception. La société propose une suite logicielle complète capable d'adresser de l'amont à l'aval la conception d'une très large gamme de produits industriels. Leurs outils numériques intègrent une multitude de concepteurs aux compétences variées en mesure de collaborer ensemble avec la garantie que les représentations qu'ils génèrent et manipulent sont compatibles.

>Dassault Systèmes crée et développe les outils numériques de conception du futur. Dans ce cadre, la société cherche à étendre sa gamme d'outils en proposant des ressources adaptées à la créativité et à l'innovation. Pour ce faire, elle expérimente quotidiennement de nouvelles technologies matérielles ou logicielles et réalise des prototypes pour la plupart confidentiels. Durant mon travail doctoral, j'ai eu l'occasion d'accéder et de contribuer à ces différents résultats ainsi qu'aux processus de conception qui leur ont donné naissance.

>Dassault Systèmes intègre un «Design Studio» chargé notamment de définir la stratégie ainsi que les produits pour les designers industriels, i.e. les interfaces, les fonctionnalités et l'expérience utilisateur. Le Design Studio se révèle être un lieu idéal pour observer la conception de nouveaux produits mais également le travail quotidien de designers industriels ayant recours à des outils numériques.

Chapitre 5

Résultats attendus

Nous présentons ici les résultats que nous comptons obtenir *via* cette recherche doctorale et nous expliquons comment ils seront obtenus. Plus exactement, nos résultats sont intégrés au sein des papiers produits au cours de ce travail. Ces derniers introduisent les problématiques, les questions de recherche ainsi que les méthodes qui les ont générés. Ajoutons que ces résultats académiques ont initié des résultats industriels concrétisés notamment par le dépôt de trois brevets et la réalisation de prototypes.

5.1 Partie II : Un nouveau modèle des outils numériques de conception

Dans un premier temps, nous nous doterons d'un modèle performant pour analyser les processus de conception des concepteurs créatifs employant des outils numériques de conception. Ce modèle mobilise quatre disciplines académiques pour identifier quels sont les modes d'actions des designers créatifs outillés lors des processus de conception. Il a été réalisé après l'analyse approfondie de quatre ateliers de conception pour les designers créatifs dont deux numériques. Ce modèle révèle des restrictions au sein des modélisations usuelles des processus de conception et suggère trois hypothèses inédites qui lèvent les précédentes restrictions.

5.1.1 Problématique et enjeux

Il existe un modèle dominant dans la littérature correspondant au NPD et décomposé en « gates » que nous appelons processus séquentiel. Celui-ci offre de très nombreux avantages qui expliquent sa diffusion massive. Il parvient notamment à articuler créativité et développement produit en les juxtaposant. Les phases d'exploration et de créativité sont effectuées au sein de phases préli-

minaires au développement produit. En revanche, ce type d'approche contraint l'intégration des profils créatifs lors des phases amont du processus. Cela conduit à un «design gap», qui demeure insoluble malgré une quantité pléthorique de tentatives académiques et industrielles afin de le résoudre. Sa conséquence la plus délicate est une dégradation forte de la générativité des concepts au profit de leur robustesse. Dans ce contexte, nous désirons enrichir notre compréhension des hypothèses implicites que le modèle séquentiel effectue en nous dotant d'un modèle adapté à notre cas d'étude. Grâce au cadre théorique puissant offert par les théories de la conception, nous souhaitons améliorer la compréhension des modes d'actions et de raisonnements mobilisés dans les outils numériques pour les designers créatifs. Nous aspirons ainsi à établir un modèle détaillé des étapes du raisonnement de conception des designers industriels qui ont recours à des outils numériques.

Quels sont les modèles alternatifs au modèle de type séquentiel? Nous posons la question de leur existence et étudierons à quoi ils correspondent. Nous pourrons ensuite développer des modèles inédits qui décrivent plus finement les actions ainsi que les modes de raisonnement des concepteurs.

Le modèle général séquentiel qui articule en les juxtaposant phase de créativité et de développement du produit ciblé pose de multiples problèmes lorsqu'il s'agit de gérer l'innovation. Cette juxtaposition implique des conséquences néfastes pour la créativité ainsi que des difficultés d'intégration pour les designers industriels. De plus, ce modèle séquentiel occulte certaines étapes pourtant cruciales pour la transformation des représentations ou des conversions d'avatars du produit à l'état de concept. Ce processus séquentiel répond à une demande de performance ciblant essentiellement le contrôle ainsi que le besoin pour l'industrie de disposer d'outils capables de concevoir des produits complexes de manière fiable, répétée et contrôlée. Un tel processus réalise des hypothèses restrictives qu'il nous faudra identifier et lever afin d'intégrer les designers créatifs dans les processus industriels.

5.1.2 Méthodologie implémentée

Nous élaborons un modèle général des suites logicielles d'aide à la conception, distinguant le raisonnement de conception, la modélisation progressive de l'objet dans la suite logicielle et les ateliers correspondant aux étapes de la conception. Ce modèle est acquis après mobilisation de quatre disciplines académiques (sciences informatiques, sciences cognitives, organisation et management et théories de la conception) et de leurs descripteurs associés appliqués à des outils numériques et traditionnels des designers industriels.

Nous décrivons un modèle puissant et précis pour caractériser finement le

processus de conception numérique. Ce nouveau modèle rendra compte des étapes de transformation et d'accumulation des données du produit qui étaient jusqu'à présent invisibles car englobées au sein de phases moins détaillées. Nous montrerons grâce à ce modèle que certaines hypothèses simplificatrices du modèle séquentiel ne sont pas incontournables et peuvent être dépassées. Nous les énoncerons et suggérerons des hypothèses alternatives qui correspondent à chacune d'entre elles. De telles alternatives fourniront un cadre contextuel élémentaire pour la suite de notre travail.

Hypothèse 1

Les ateliers de conception réalisent forcément un Trade-Off entre robustesse et générativité de la conception. C'est uniquement en abandonnant des degrés de liberté et d'originalité (générativité de la conception) que les concepteurs sont capables de converger, de réduire les incertitudes et d'augmenter la connaissance du produit (robustesse de la conception).

Hypothèse alternative 1'

Certains ateliers numériques de conception possédant des propriétés bien spécifiques peuvent offrir un gain simultané de robustesse et générativité de la conception.

Hypothèse 2

Les avatars, i.e. les multiples représentations de l'objet en cours de conception dans la suite numérique, résultent de couches successives de conception qui correspondent à un raffinement progressif de l'objet.

Hypothèse alternative 2'

Les avatars ne sont pas le résultat de couches successives qui proviendraient d'un simple raffinement progressif de l'objet. Ils sont l'instanciation à un moment précis d'un algèbre de règles qui est généré au cours de la conception.

Hypothèse 3

La logique d'accumulation durant la conception est une logique de sélection durant laquelle des paramètres sont successivement instanciés. Au sein de cette logique, se succèdent accumulation, sélection et validation.

Hypothèse alternative 3'

La logique d'accumulation est une logique d'enrichissement de la base de règles permettant d'instancier des familles de produits. Elle rend possible une

logique pour laquelle des paramètres ne sont pas inéluctablement instanciés de manière successive.

A partir des hypothèses restrictives du modèle précédent, dont l'identification a été rendue possible par l'utilisation de notre nouveau modèle, nous formulons trois alternatives qui conduisent à nos résultats principaux. Ces trois nouvelles hypothèses donnent accès à des modes d'intégration des designers industriels créatifs distincts de la juxtaposition du modèle séquentiel et contribuent à l'élaboration de nouveaux outils numériques de conception ainsi que de processus inédits pour les articuler. L'hypothèse 1' suggère l'existence d'ateliers de conception aptes à améliorer simultanément deux aspects apparemment opposés de la conception, sa générativité et sa robustesse.

5.2 Partie III : des ateliers capables de proposer simultanément robustesse et générativité

L'intuition relative aux processus de conception estime qu'il n'existe pas d'alternative au modèle séquentiel. Ce dernier suppose que la conception est une succession d'étapes lors desquelles des degrés de liberté sont progressivement abandonnés contre une connaissance enrichie du produit ainsi qu'une réduction des incertitudes. Ce type de processus conduit exclusivement à des situations de Trade-Off entre robustesse et générativité lors de son déroulement. Ceci induit un biais quant aux capacités des ateliers qui remplissent un cahier des charges implicite. Les ateliers produisent du Trade-Off afin de pouvoir améliorer la faisabilité des concepts, au détriment de leur part d'originalité.

Afin de montrer que cette hypothèse est limitative, nous identifions un atelier de conception aux propriétés spécifiques et nous montrons qu'il est susceptible de fournir un gain simultané en robustesse et générativité de la conception. Pour ce faire, nous élaborons un protocole expérimental ciblant le «design gap» et nous comparons sa performance à celle d'un autre atelier. Cette capacité à améliorer simultanément robustesse et générativité de concepts est rendue possible par une technique que nous appelons «originalité acquise». L'«originalité acquise» correspond ainsi à la propriété pour un concept de répondre de façon générative à une contrainte spécifique inconditionnée.

Avec la capacité de générer des concepts possédant la caractéristique d'«originalité acquise» sur certaines de leurs contraintes, le processus de conception peut être davantage qu'une simple évolution de représentations construites par étapes. L'avancement de la définition progressive de l'objet est ainsi remise en cause. En effet, si le respect d'une contrainte spécifique est acquis alors il devient inutile de solliciter des phases de raffinement ultérieures du concept et de ses représentations dans la suite logicielle numérique. Il devient alors possible d'or-

ganiser différemment l'enchaînement des étapes de conception. Dans ce cadre, nous allons démontrer que l'hypothèse simplificatrice H2 du modèle séquentiel peut également être dépassée.

5.3 Partie IV : des processus de conception renouvelés qui exploitent la créativité des concepteurs

Alors que l'intuition considère que l'innovation est opposée au contrôle dans les processus de conception, les recherches les plus récentes ont montré des modèles susceptibles de répondre à cette double exigence sous certaines conditions. Nous tâcherons de vérifier que ces résultats cohérents dans les conditions de processus de conception outillés numériquement. De plus, de tels résultats peuvent être employés afin de déterminer une méthode pour contrôler direction, intensité et radicalité de l'innovation.

Nous montrons alors qu'il est possible d'introduire une généralisation des modèles "architecture modulaire" et "glissement de concept". Celle-ci est rendue possible par certaines caractéristiques des ateliers qui lorsqu'ils sont manipulés par des designers industriels créatifs parviennent à simultanément apporter contrôle et pilotage de l'amplitude de l'innovation. Cette capacité peut amener à envisager de nouveaux processus de conception et de développement que nous appelons New Design Processes (NDP). Ces derniers requièrent des ateliers aptes à travailler sur une contrainte de façon générative, à condition toutefois que celle-ci soit exposée et que le designer industriel dispose d'un outil approprié pour la traiter.

Les nouveaux processus opérant sur des contraintes spécifiques et utilisant comme ressource la base de règle accumulée nécessitent des ateliers ainsi que des outils aux propriétés spécifiques. Il est nécessaire de mieux caractériser les outils de conception numérique et de comprendre comment il est possible d'acquérir une telle performance. Les outils numériques manifestent en effet des propriétés distinctes selon qu'ils s'adressent aux ingénieurs et artistes 3D. Pourtant, aucun des deux environnements précédemment cités ne semble correspondre aux attentes des designers industriels.

5.4 Partie V : de nouveaux outils numériques pour les designers industriels

Au sein de cette partie, nous caractériserons de manière détaillée les distinctions existantes entre les outils variés de CAO. Ces derniers ont été conçus pour

répondre précisément aux besoins d'une multitude de professions mobilisant des raisonnements de conception différents. Or, lorsque l'on se cantonne à étudier le média de conception (i.e. l'outil logiciel et l'ordinateur), ainsi que la représentation manipulée, c'est-à-dire un modèle 3D affiché sous la forme finale de pixels, il est délicat de les caractériser et de les différencier. Pour ce faire, nous proposons une nouvelle modélisation qui met en évidence les raisonnements de conception.

Nous identifions alors trois raisonnements de conception distincts. Nous appelons la capacité des outils conçus pour les ingénieurs la création de «domaines de validité et d'algèbres de règles», pour atteindre de la «généricité de masse». Nous appelons la capacité des outils des artistes 3D la «création de liste denses et détaillés» pour accéder à la «singularité maximale». De plus, concernant les outils des designers industriels, il s'agit de créer des «modèles conceptuels» pour réaliser de la «singularité de masse».

Nous en déduisons ainsi les propriétés spécifiques que nécessitent les concepteurs créatifs intégrés dans les processus industriels de conception et par là même les moyens de renouveler, de supporter et même d'encourager l'innovation par l'intermédiaire d'ateliers créatifs.

Deuxième partie

Une nouvelle modélisation du processus de conception outillé

Chapitre 1

Problématique et enjeux

Il s'agit ici d'évaluer le potentiel d'intégration des méthodes des designers industriels créatifs au sein de processus de conception par la perspective des outils numériques.

1.1 Les modèles dominants du processus de conception réalisent des simplifications implicites

Nous proposons une nouvelle approche pour l'assimilation des designers industriels créatifs. Nous émettons l'hypothèse qu'une telle opération est problématique pour des raisons en partie liées à une modélisation du processus de conception industriel basée sur des hypothèses simplificatrices. Cette modélisation entraîne un biais dans la proposition d'outils de conception pour les designers industriels et une grande difficulté à répondre à leurs besoins. Répondre à ce challenge suppose alors une modification des processus de conception afin de les enrichir. Nous devons alors nous doter d'un modèle qui supportera notre démonstration. Quels sont les modèles des processus de conception industriels qui existent ? De quels modèles disposons-nous pour traiter cette intégration ?

S'il existe plusieurs modèles dans la littérature, l'industrie produit des formes de représentation assez similaires au «Stage Gate» ([22, 23]) lorsqu'il s'agit de modéliser le «New Product Development» (NPD). Cette modélisation du processus représente la conception comme une succession d'étapes visant chacune à améliorer la définition du produit en cours de conception. Ces étapes identifiées se succèdent pour progressivement intervertir des degrés de liberté de conception contre de la connaissance sur le produit, ce qui conduit à diminuer au fur et à mesure les incertitudes. La conception s'achève lorsque tous les degrés de liberté ont été épuisés et les incertitudes levées.

Cette modélisation est issue d'une longue tradition d'ingénierie de la conception initiée afin d'améliorer, de fiabiliser et de systématiser l'élaboration de

produits ([84]), ce qu'elle parvient à faire avec succès. Elle orchestre alors la décomposition en silos métiers et est très largement répandue dans les entreprises. Ce processus séquentiel est parfois représenté sous des formes similaires dans la littérature comme l'illustrent les Figures 1.1 et 1.2 ([77, 108, 103, 59]).

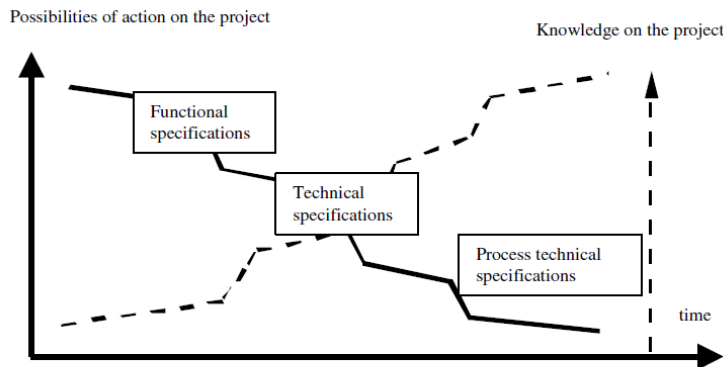


Fig. 1. Project convergence.

FIGURE 1.1 – Product knowledge and design freedom versus time ([74]).

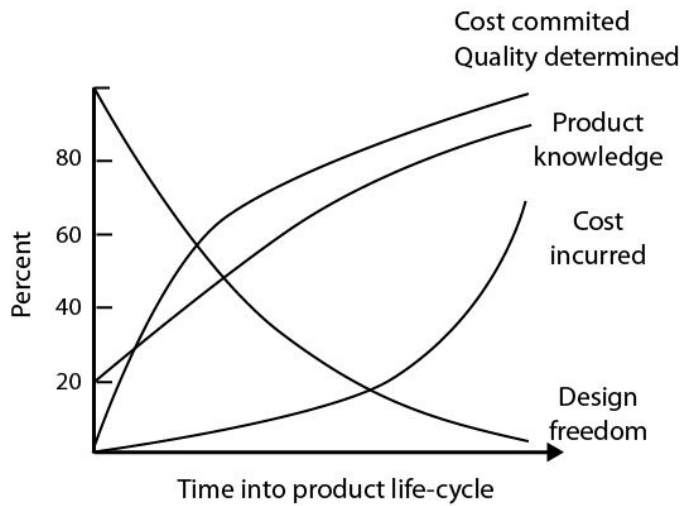


FIGURE 1.2 – Product knowledge and design freedom versus time ([59]).

Au sein de cette littérature, principalement issue de l'analyse de processus de l'industrie automobile, les chercheurs constatent qu'à mesure des prises de décision, les possibilités de modifier le produit deviennent limitées. Initialement,

le concepteur dispose d'une grande liberté d'action car peu de décisions ont été prises et peu de capital investi. Toutefois, lorsque la production du produit est amorcée, toute modification devient extrêmement coûteuse, restreignant les libertés d'action. Ainsi, l'objectif industriel du processus de conception est de disposer d'une connaissance la plus rapide et la plus étendue du produit en cours d'évolution, les premières phases étant les moins dispendieuses. Ceci conduit à un paradoxe de la conception. Plus les connaissances du projet sont importantes, moins il existe de possibilités d'utiliser ce qui a été appris ([108]). Au fur et à mesure de la complexification de l'ensemble des produits industriels, quelles que soient les industries, ce type de processus et modèles se sont ainsi progressivement imposés.

C'est dans ce cadre que la plupart des suites de conception numérique ont été conçues et continuent de l'être ([27]). Ces outils visent à progressivement raffiner une ou plusieurs représentations du produit en cours de conception. Les suites logicielles, qui sont de plus en plus complexes, segmentent et décomposent la conception des produits non seulement par métiers et spécialités mais aussi en fonction de la place de l'outil dans le processus de conception. Il est généralement considéré qu'en début de processus les outils doivent permettre d'exprimer des représentations peu définies et que le résultat final de modélisation du produit se doit de correspondre exactement à ce que sera le produit final, à la tolérance de fabrication et d'assemblage près.

Cette modélisation du processus est souvent présentée sous la forme séquentielle suivante comme le montre en exemple la Figure 1.3.

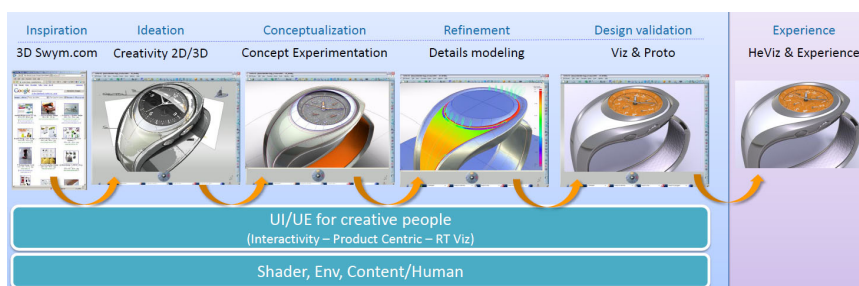


FIGURE 1.3 – Modélisation du processus de conception servant de support à la conception d'outils numériques.

Nous qualifions ce processus de «séquentiel». Ce processus mobilise successivement des outils permettant de produire une représentation de plus en plus précise du futur objet, la maquette numérique. Les phases ne sont pas seulement identifiées, elles ont aussi une correspondance parfaite avec les suites de

conception et leurs méthodes de conception. La Figure 1.4 illustre un processus de conception séquentiel.

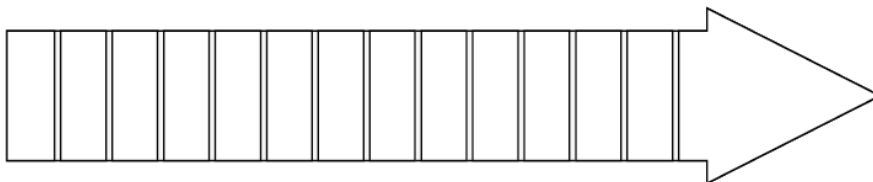


FIGURE 1.4 – Modélisation du processus de conception décomposé en étapes faisant successivement appel à des ateliers de conception.

Ce découpage et ce fonctionnement ont été décidés afin de garantir que, lorsque le produit sera manufacturé, la totalité de ses dimensions auront été préalablement conçues. Ceci implique que le modèle numérique complet géométrique décrive à la tolérance près l'intégralité des dimensions géométriques de l'objet. Autour de cette fonction essentielle se sont ensuite progressivement ajoutés d'autres ateliers de conception définissant d'autres caractéristiques du produit telles que l'aspect, la logique ou ses fonctions.

1.2 L'hégémonie des processus séquentiels dans la conception industrielle

1.2.1 Les avantages de ce modèle séquentiel pour l'industrie sont nombreux

Lors de la formulation du modèle séquentiel général, il existait un cahier des charges implicite. L'utilisation de cette modélisation du processus a permis et permet encore de répondre à un nombre important d'attentes des entreprises et des concepteurs qu'elles emploient, notamment le contrôle des réalisations, l'organisation des activités ou encore les formations ([67]). Par ailleurs, le modèle séquentiel a inspiré la conception d'outils adaptés à chacune des phases identifiées. De plus, une telle modélisation a rendu possible la collaboration de profils de professionnels extrêmement variés en décomposant les tâches de conception par silos métiers. Elle a ainsi offert intégration, hiérarchie, contrôle et structure aux organisations tout en orientant le développement de compétences et leur diffusion. Par ailleurs, elle a produit des objets d'une complexité extrême (voiture, avion, bateau et bâtiment par exemple). Plus l'objet est complexe, plus il est décomposé en sous-systèmes et parties. Les expansions (variété des produits

conçus) sont réalisées avec une relativement faible quantité de ressources. Certains considèrent même que les bureaux d'étude, un maillon indispensable de la constitution des grandes entreprises industrielles, ont été créés grâce à cette organisation ([66]). De telles propriétés devront impérativement être conservées lors de la formulation de notre nouveau modèle. Il s'agit du cahier des charges minimum que nous devons impérativement conserver. Il s'agit également de disposer de capacités d'innovation radicales qui puissent être contrôlées, pilotées et orientables. Autrement dit, ce dernier aspect signifie une capacité à intégrer la créativité, et notamment les designers industriels créatifs.

1.2.2 Le processus séquentiel opère également une juxtaposition des phases créatives et de développement industriel

Un tel processus de conception offrant un grand nombre d'avantages, il a été très largement diffusé et s'est imposé. Sa remise en question n'a pas été jugée nécessaire car bien que, négativement corrélé à la créativité ([46]), il possède un intérêt supplémentaire. En effet, sa forme séquentielle autorise l'adjonction presque illimitée d'étapes.

Toutefois, ce modèle considère que degrés de liberté et connaissance du produit sont deux valeurs opposées. Une phase consacrée à la créativité s'est naturellement imposée en amont du processus que nous avons appelé « creative front end ». Pour adresser cette problématique certains chercheurs proposent d'intégrer des phases de liberté et d'exploration en début de processus, phases qui prennent le nom de «Fuzzy Front End» ([64, 52, 61, 89]). Cette phase amont floue doit être au maximum libérée des contraintes avant de déboucher sur des étapes de sélection et de diminution d'incertitudes. D'autres chercheurs parlent de «Front loading» ([104]). Si la dénomination est différente, l'objectif est similaire, à savoir examiner lors des phases amont du processus des problèmes usuellement résolus plus tardivement. Ceci est rendu possible par l'utilisation des outils numériques et notamment de ce que Thomke et Fujimoto appellent des prototypes haute-fidélité ([104]). Comme l'illustre la Figure 1.5 le processus est accéléré.

Il a été proposé de définir un langage commun pour décrire et caractériser le «Fuzzy Front End». Le «Front End of Innovation» est spécifié comme la phase qui précède le développement de produit qui est très structuré et englobe l'ensemble des diverses activités ([63]). Sa forme circulaire dans la Figure 1.6

suggère que les idées doivent jaillir, itérer et interagir. En contraste, la phase de développement de produit est sous la forme d'une série d'étapes séquentielles, bien déterminées et ordonnées chronologiquement.

De plus, un mode d'intégration par juxtaposition permet de ne pas modifier les processus de développement déjà standardisés tout en offrant un espace d'exploration sensé favoriser l'innovation, le transfert de connaissances ainsi que les explorations. Il est ainsi possible de décomposer créativité et développement produit en deux étapes distinctes. Afin de ne pas perdre le lecteur dans l'utilisation de termes différents qualifiant la même chose, nous emploierons le terme de « creative front end ». Nous illustrons ainsi le processus sous la forme générale de la Figure 1.7.

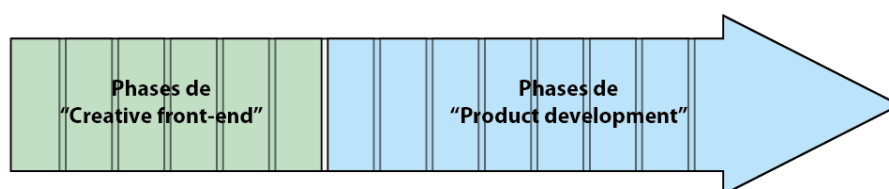


FIGURE 1.7 – Le processus de conception séquentiel en deux temps : créativité et développement produit.

Pourtant certains critiquent ces phases initiales perçues comme longues, énigmatiques et souvent très perfectibles. Ils suggèrent qu'il n'existe pas de "bonnes" pratiques spécifiques optimales et qu'il serait intéressant de réduire le caractère exploratoire de ces phases en mobilisant des analyses statistiques associées à des données économiques ([90]).

1.2.3 La segmentation attire des critiques de la part des designers industriels

Les designers industriels ne se satisfont pas de cette méthode d'intégration par juxtaposition pour plusieurs raisons ([16]). Tout d'abord, ils prescrivent notamment les dimensions extérieures des produits qu'ils conçoivent ([106, 107]). A ce titre, ils souhaitent intervenir tout au long du processus afin d'être certains que leur conception initiale ne sera pas trahie. Lorsqu'ils s'expriment lors de phases de « creative front end » ils emploient généralement des médias de conception traditionnels tels que le maquettage, « clay modeling » ou encore le « sketching » ([42, 100, 40, 101, 34, 35]). Ces médias sont intensivement exploratoires et favorisent la créativité. En effet, de telles ressources fournissent un moyen de suggestion et d'exploration davantage que de prescription claire.

Toutefois, ces atouts se meuvent en contrainte dès lors qu'il s'agit de transmettre à d'autres le concept. Ces médias comportent en effet une large part d'ambiguïté et fournissent peu de détails. Bien plus, en compartimentant la créativité et en limitant l'intervention des designers industriels aux phases amont du processus il existe un fort risque d'interprétation erronée ou de simplification de leur concept initial, ce qu'ils vivent comme une trahison. En effet, un détail insignifiant pour les autres concepteurs mais crucial pour les designers industriels peut être éliminé lors des phases de développement. Il est, par ailleurs, délicat d'utiliser ces médias comme moyen de prescription, alors qu'ils sont pour le concepteur créatif un «moyen de discuter avec lui-même» et «de faire avancer son concept», comme le souligne Schön dans ses deux ouvrages ([92, 93]. Les designers industriels sont ainsi rarement en mesure de savoir ou de prédire les éléments du concept qui sont impérativement à conserver sans suivi de celui-ci au cours de ses nombreuses phases de développement.

Enfin, il est également courant que lorsque des impératifs de développement spécifiques, tels que des délais très courts ou l'obligation d'utiliser une technologie, il soit demandé aux designers industriels d'intervenir sur des objets quasiment entièrement conçus. Lors de telles situations, les phases créatives sont souvent les premières à être «sacrifiées». De plus, les designers industriels s'accommodent très mal de ces interventions tardives et comparent cet état à de «l'habillage de bossu» ([70]). La Figure 1.8 illustre ce type de travail d'emballage.

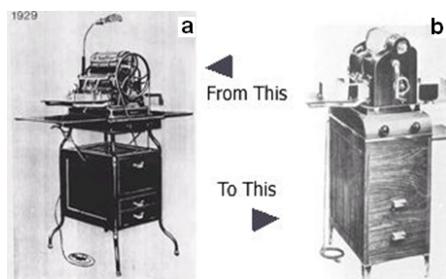


FIGURE 1.8 – La machine Gestetner à dupliquer (a) avant et (b) après l'intervention de Loewy.

1.2.4 Le design gap est un épineux problème de la juxtaposition

L'usage de ce processus séquentiel ainsi que son mode d'intégration de la créativité par juxtaposition pose un autre problème, dont les solutions sont ardemment débattues dans la littérature des outils de conception numériques. Le

passage des phases amont créatives aux phases de développement produit induit généralement un «design gap» ([106, 107, 4, 118]). Il s'agit d'une "incapacité pour les concepteurs de disposer d'outils numériques pour effectuer les premières étapes de la conceptualisation du futur produit". Une telle incapacité à disposer d'outils numériques offrant les mêmes performances d'exploration et de créativité que les outils traditionnels, contraint les concepteurs à conserver et faire évoluer leurs concepts sous une forme qui n'est pas intégrable sans perte pour l'industrie. La richesse des médias traditionnels est perdue lors de la conversion des données en représentations sauvegardées numériquement. De plus, il est difficile pour un concepteur de maîtriser simultanément la conceptualisation sous sa forme traditionnelle et une expertise des outils de CAD. En conséquence, cette conversion de données est souvent gérée par des modelers spécialisés. Cette médiation additionnelle renforce l'éloignement avec le concept initial et accentue la perte de contrôle dont les designers industriels se disent victimes.

Par ailleurs, les concepteurs d'outils étudient depuis longtemps cette délicate question. Les chercheurs en sciences informatiques s'efforcent également de résoudre cette transition entre créativité intensive et développement industriel sans perte. Les espaces hybrides d'idéation en sont un bon exemple, illustrés en Figure 1.9 ([29, 31]).



FIGURE 1.9 – L'espace hybride d'idéation ([29, 31]).

Plusieurs approches sont proposées, liées majoritairement à la création d'outils reproduisant les modalités physiques d'interaction des designers lorsqu'ils emploient des moyens traditionnels (en opposition à ceux du numérique). Les interfaces sont inspirées du dessin (outil historique des concepteurs créatifs) et de la sculpture sur glaise (technique très utilisée par les designers industriels du domaine de l'automobile). Les propositions de nouveaux outils de conception pour les designers industriels sont principalement axées sur les phases qui précèdent le «design gap», ou sur le «design gap» lui-même ([3]), à l'endroit identifié en Figure 1.10.

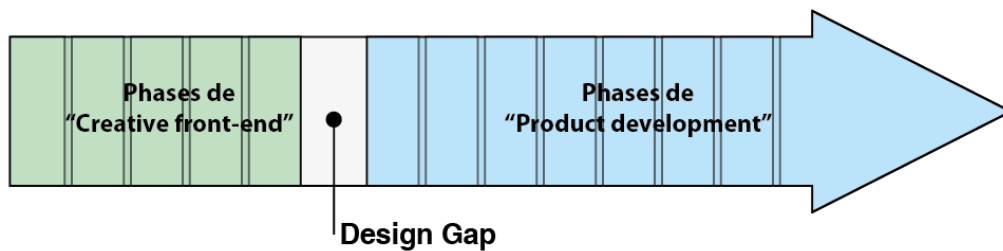


FIGURE 1.10 – Le processus de conception séquentiel en deux temps, avec le «design gap» qu’il génère.

1.3 Le modèle séquentiel est un cas particulier qui se fonde sur des hypothèses simplificatrices.

Le modèle séquentiel du processus est omniprésent et incontournable dans l’industrie mais nous doutons de sa performance lorsqu’il s’agit d’intégrer des designers industriels créatifs afin d’atteindre des innovations radicales. En fait, la modélisation du processus implique un grand nombre d’hypothèses simplificatrices (dont découlent également ses nombreux avantages). Nous en identifions trois qui jouent un rôle majeur quant à la nature de la conception dans la suite logicielle. Nous allons les répertorier et les commenter afin qu’un nouveau modèle capable d’intégrer la créativité différemment de la juxtaposition émerge.

1.3.1 Première hypothèse

Le processus de conception proposé par la littérature pour la conception numérique d’outils est de forme séquentielle. Il suggère une exploration libérée des contraintes lors des phases de «creative front end». Durant les phases de développement ultérieures, il intervertit degrés de liberté et acquisition de connaissances sur le produit

De manière cohérente, une telle tendance est contenue dans les propriétés des outils qui sont mobilisés par les concepteurs. Ainsi, lors des phases de «creative front end » les outils employés par les concepteurs offrent beaucoup de liberté et de grandes capacités d’exploration tout en négligeant les contraintes industrielles qui seront appliquées par la suite. Plus tard, lors du développement, l’inverse se produit : la créativité est progressivement abandonnée au cours du développement du produit. Les outils visent à réduire les parts d’inconnu du concept et à augmenter son respect aux contraintes industrielles.

En conséquence, les étapes sont également des trade-off locaux. Lors de chaque étape se déroule ce processus d’échange et de compromis. Soit l’outil

propose de la créativité mais ne se préoccupe pas des contraintes, soit il définit rigoureusement l'objet mais oblitère son originalité ainsi que ses dimensions créatives. Quelle que soit la phase du processus séquentiel considéré, les outils associés sont de type trade-off. Le modèle séquentiel effectue donc une hypothèse restrictive que nous reformulons.

Hypothèse restrictive 1

Les ateliers de conception réalisent forcément un trade-off entre Robustesse et Générativité de la conception.

1.3.2 Seconde hypothèse

Le processus de conception outillé par des suites numériques suggère aux concepteurs de manipuler des représentations du concept qui correspondent à ses différents stades d'évolution. Le concept est alors initialement décrit par son cahier des charges, puis sa logique fonctionnelle et logique, et enfin sa géométrie dans le logiciel. Plus la suite est puissante, plus elle offre de types de représentations différentes et les outils correspondant pour les manipuler. Dans le cas des représentations géométriques, celles-ci sont transmises tour à tour aux différents concepteurs qui détaillent les sous-parties du concept dont ils ont la responsabilité. D'abord, une esquisse sous forme de grands volumes, puis un modèle grossier, et enfin un modèle 3D correspondant dans toutes ses dimensions à une instanciation numérique du futur produit qui sera conçu.

Hypothèse restrictive 2

Les modèles manipulés par la suite logicielle numérique, multiples représentations de l'objet en cours de conception, sont le résultat de couches de successives qui correspondent à un raffinement progressif de l'objet. Plus le processus est avancé, plus les représentations sont fidèles à l'objet qui sera fabriqué (aux tolérances de fabrication près).

1.3.3 Troisième hypothèse

A chaque étape de conception le nombre d'alternatives possibles se réduit, au fur et à mesure de la prise en compte des contraintes industrielles et du respect du cahier des charges. Le processus de conception sélectionne et valide les propositions et écarte les solutions non conformes. Les outils de vérification et d'évaluation présents dans la suite CAO facilitent ce travail en prescrivant les dimensions conformes et non conformes.

Hypothèse restrictive 3

La logique d'accumulation durant la conception est une logique de sélection lors de laquelle des paramètres du futur produit sont successivement instanciés.

1.4 Un nouveau modèle est nécessaire pour considérer des hypothèses reformulées

Il s'agit dorénavant d'obtenir un nouveau modèle d'intégration pour les concepteurs créatifs à méthode en choisissant la voie des outils. Comme déjà évoqué, ce modèle présentera les mêmes avantages que le précédent, intégrera les designers industriels mais aussi sera en mesure d'inspirer des outils numériques assurant cette intégration si ces derniers n'existent pas. Pour ce faire, nous allons déterminer un modèle d'activité des designers créatifs renseignant également quant aux autres concepteurs créatifs à méthode.

Chapitre 2

Cadre et objectifs de ce travail

2.1 Objectifs

Le modèle séquentiel qui intègre la créativité en la juxtaposant au développement du produit en début de processus n'est pas incontournable. Il semble qu'il existe des alternatives que nous allons identifier et modéliser. Quels sont les modèles alternatifs au modèle de type séquentiel ? Nous posons la question de leur existence et étudierons à quoi ils correspondent. De par cette analyse, un modèle inédit sera élaboré pour décrire finement les actions ainsi que les modes de raisonnement des concepteurs. Par ailleurs, un tel modèle devrait également proposer de nouvelles solutions pour intégrer les concepteurs créatifs dans des processus outillés numériquement sans dégrader leur créativité.

2.2 Cadre

Le modèle général séquentiel qui articule en les juxtaposant phase de créativité et de développement produit est peu adapté aux innovations radicales. Cette juxtaposition est néfaste pour la créativité et implique des difficultés d'intégration pour les designers industriels. Le modèle séquentiel occulte également certaines étapes pourtant primordiales de transformation des représentations ou de conversions des avatars du produit à l'état de concept. Ce processus séquentiel répond à un besoin pour l'industrie de disposer d'outils capables de concevoir des produits complexes, fiables, reproductibles et dont la qualité est contrôlée. Cependant, le modèle formule des hypothèses restrictives que nous avons identifiées et que nous souhaitons lever.

Chapitre 3

Méthodologie

Afin d'examiner la question de l'intégration des designers industriels dans les processus de conception mobilisant les outils de conception numérique, nous allons dans un premier temps élaborer un modèle plus performant pour analyser les processus de conception des concepteurs créatifs. La performance attendue de ce nouveau modèle est double.

- 1/ Il doit intégrer les processus modélisés par le modèle séquentiel en offrant les mêmes avantages, notamment au niveau du contrôle.
- 2/ Il doit également générer de nouveaux processus de conception adaptés aux concepteurs créatifs, en particulier les designers industriels.

Nous mobilisons une méthode empirique pour élaborer notre modèle. Pour ce faire, nous identifions quatre disciplines académiques incontournables dès qu'il est question d'outils numériques de conception. Ces quatre disciplines sont les sciences informatiques, sciences cognitives, organisation et management et théories de la conception. Chacune de ces disciplines a analysé le modèle séquentiel *via* des descripteurs spécifiques qui permettent d'en caractériser les propriétés. Plus exactement, nous recherchons des caractéristiques liées à l'intégration d'ateliers créatifs sous une forme autre que séquentielle. Un tel examen identifie et renseigne quant aux propriétés inédites qui sont indispensables pour générer notre modèle qui se doit de répondre à notre cahier des charges précédemment explicité.

De plus, comme notre modélisation rendra compte de l'utilisation des outils de CAO, nous la générerons en employant deux outils archétypaux de la conception.

- 1/ Le premier est un atelier central à toute suite de CAO, il s'agit d'un atelier d'assemblage destiné à positionner des représentations géométriques dans l'espace. Cette tâche est généralement appelée «Compose».
- 2/ Le second atelier propose aux concepteurs des outils de modélisation géométrique d'un type innovant dans une suite industrielle. Il a été spécifiquement

créé pour adresser les besoins des designers industriels. De plus, il présente un certain nombre de caractéristiques intéressantes pour la suite de notre étude que nous développerons par la suite.

Enfin, afin de démontrer la validité ainsi que la flexibilité de notre modèle (ne rendant pas uniquement compte de situations de conception mobilisant des outils de CAO), nous l'appliquerons à deux cas distincts qui sont toutefois des références pour le milieu du design industriel.

3/ L'activité de «sketching» est souvent considérée comme archétype de l'activité des designers industriels ([58]). Il est donc important de confronter notre modèle à un tel atelier, qui possède des propriétés cruciales pour la conception.

4/ Un atelier de formation à la créativité proposé dans l'école du Bauhaus par Johannes Itten ([54]). Pour beaucoup, le Bauhaus est une des premières écoles de design industriel ([32]). Les cours d'éveil à la créativité en première année de formation étaient alors considérés comme un module essentiel pour l'intégralité des étudiants de l'école.

3.1 Quatre disciplines académiques pour l'étude des outils de conception numériques

Nous désirons établir un nouveau modèle du processus de conception lorsque celui-ci est effectué avec des outils numériques. Une telle démarche libère de la fixation sur le modèle séquentiel et propose d'autres modalités d'intégration pour les designers industriels. Afin de caractériser précisément et finement les évolutions du produit en cours de conception ainsi que les modes d'actions et de raisonnement mobilisés par ses concepteurs, nous nous appuyons sur quatre disciplines académiques majeures régulièrement mobilisées ([9]) pour répondre à de telles problématiques.

Après une brève description de chacune de ces disciplines, nous allons plus particulièrement sonder dans leurs littératures respectives les résultats qu'elles produisent à propos du modèle séquentiel et ce, afin de proposer des alternatives innovantes (cf. Fig.3.1).

3.1.1 Sciences informatiques

Définition

D'après Computer Science handbook ([109]) :

«Les sciences informatiques sont l'étude des processus informatiques et des structures d'information, incluant les réalisations matérielles, leurs modèles et applications».

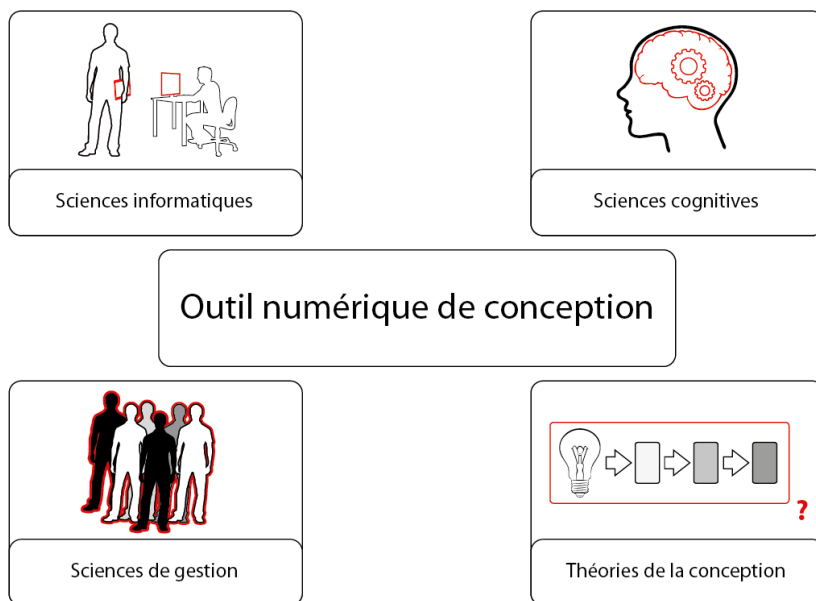


FIGURE 3.1 – Décrire les outils numériques de conception mobilise des descripteurs issus de quatre disciplines : sciences informatiques, cognitives, de gestion et les théories de la conception.

Les principes de la théorie des sciences informatiques reposent certes sur un formalisme mathématique rigoureux mais également sur les méthodes formelles des sciences physiques, biologiques et sociales. De par leur nature, les sciences informatiques consistent en une discipline fortement interdisciplinaire qui peut être analysée selon plusieurs perspectives. Par ailleurs, les outils informatiques qu'elle produit impactent profondément le contexte socio-professionnel ainsi que l'environnement économique des entreprises qui les emploient.

Pour le grand public, il est possible de les décomposer en deux grandes catégories :

>Le matériel. Il s'agit des objets informatiques en tant que tels. Les processeurs, mémoires, disques durs et d'autres éléments composent le calculateur. Un ordinateur complet est obtenu en ajoutant des interfaces homme-machines telles que clavier, souris et écran.

>Le logiciel. Il s'agit des informations sauvegardées dans les mémoires du matériel qui rendent possible le fonctionnement des programmes. Par l'intermédiaire de ces programmes, les utilisateurs effectuent des tâches multiples telles que le divertissement ou la conception.

Les sciences informatiques sont capables, concernant le processus de conception séquentiel, de modéliser une grande quantité des dimensions du produit à l'état de concept. Elles identifient des phases qui correspondent à des étapes de conception. La Figure 3.2 illustre une modélisation séquentielle du processus

utilisée pour créer des outils.

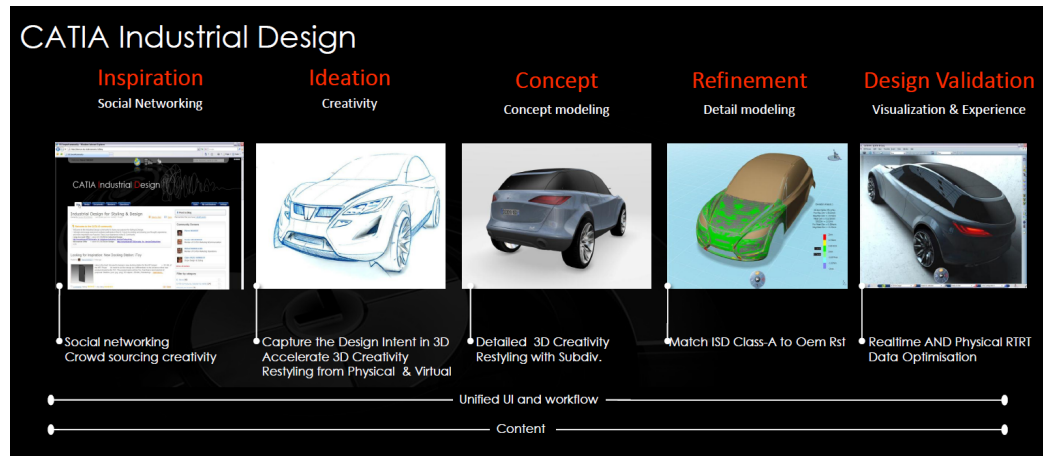


FIGURE 3.2 – Le processus de conception séquentiel vu par les fabricants d’outils numériques.

Il apparaît que ces étapes séquentielles sont, en fait, des boucles itératives à la récursivité plus ou moins complexe. Cette forme détaillée présentée en Figure 3.3 indique clairement les domaines pour lesquels les sciences informatiques faillissent.

Les outils numériques ne fournissent pas certaines représentations essentielles

Les sciences informatiques ne sont pas en mesure de capturer l’ensemble des propriétés des concepts. Lors des étapes initiales de conception, les designers industriels réalisent une quantité importante de représentations, la plupart sous forme de dessins appelés « sketches ». Lorsque ceux-ci sont numérisés, c’est-à-dire lorsque se produit le « design gap », certaines des propriétés et intentions initiales de conception sont abandonnées. Ce processus de sélection présente le risque de supprimer des dimensions du concept qui peuvent être essentielles pour son créateur.

De plus, les types de représentations proposées dans les suites de conception numérique sont encore limités principalement aux dimensions géométriques des concepts. Ajoutons toutefois que pour certains cas, il est parfois possible d’intégrer dans le cahier des charges une description logique ou fonctionnelle.

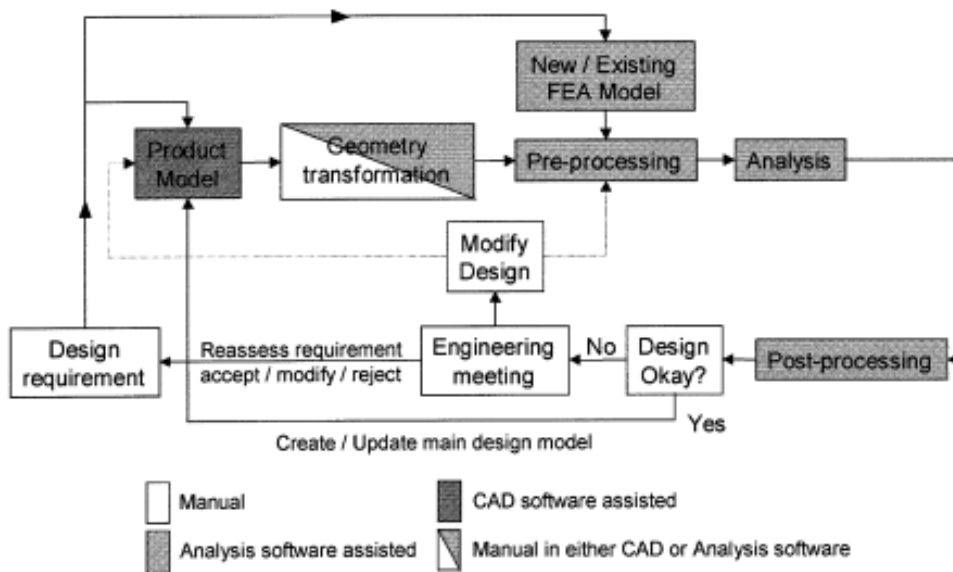


FIGURE 3.3 – La boucle d’analyse du processus de conception ([18]).

Nous proposons une alternative : capturer les dimensions sensibles du concept et les intégrer dans les suites de conception

Des recherches tentent d’intégrer notamment des dimensions sensibles. Il s’agit d’une méthode, appelée le Kansei Design. Egalement appelée ingénierie Kansei, cette branche de la conception vise le développement de produits et services en tirant partie de la psychologie et des sentiments des clients utilisateurs. Cependant, ces projets sont pour le moment à l’état de prototypes ([81, 9, 87]) et n’ont pas encore été intégrés dans des suites de conception industrielles malgré leur grand intérêt. La Figure 3.4 expose les principales dimensions ciblées par le Kansei design.

Les représentations numériques tendent à fixer très tôt l’identité des objets en cours de conception

Les sciences informatiques sont capables de manipuler des représentations très complexes et très détaillées mais peinent à représenter un foisonnement d’alternatives. Par leur côté immédiat, peu coûteux en termes de temps ainsi que d’investissement pour le concepteur, les sketches restent un moyen encore inégalé pour représenter des quantités importantes de concepts. La Figure 3.5 expose la grande variété de concepts différents explorés lors d’un travail de «sketching».

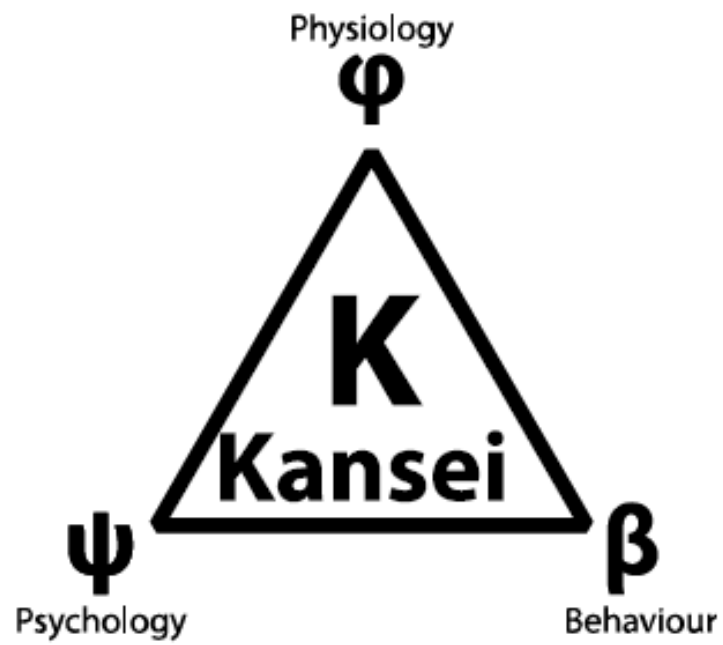


FIGURE 3.4 – Les différentes dimensions du Kansei design ([87]).

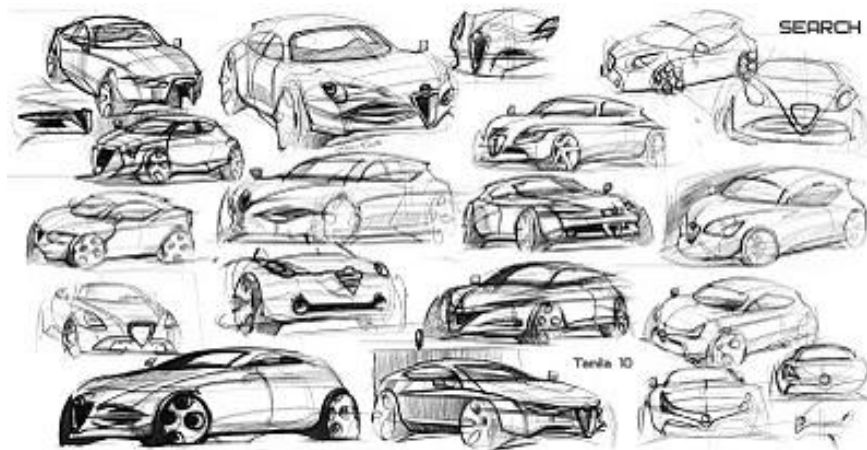


FIGURE 3.5 – Sketches de recherche de formes pour un concept automobile, Alfa Mito par Tamila Abuseridze.

Nous suggérons une alternative : proposer des représentations numériques imprécises

Le «flou» induit par le sketch est notamment une manière pour les designers industriels de conserver une partie du potentiel «indécidé» et imprévisible des concepts. Il s'agit d'un espace de discussion, d'une ressource de conception générative. Le flou pourrait être utilisé dans le numérique pour représenter plusieurs alternatives qui répondent toutes à une contrainte. Par exemple un fatras de courbes qui possèdent toutes certaines propriétés et sont contenues dans un espace restreint, correspondant au cahier des charges. Cette méthode de «courbes conformes» est utilisée par les designers industriels qui font de la recherche de forme sur des «packages automobiles».

La majorité des interactions de conception s'effectuent à l'aide d'un clavier et d'une souris. Actuellement, les moteurs des logiciels de CAO (modeleurs ou kernels géométriques) conservent et traitent des quantités colossales de données. Ils mobilisent principalement des techniques de modélisation paramétriques qui reposent sur des fonctions et des paramètres construisant des représentations précises et évolutives des concepts. Toutefois une excellente maîtrise de l'outil ainsi qu'une capacité de concevoir de manière fractionnée et prédictive sont requises ([104]). Ces outils sont aujourd'hui intensivement utilisés par les interfaces standard clavier et souris. Certaines interfaces telles que la tablette graphique illustrée en Figure 3.6 restent peu compatibles avec les suites de CAO industrielles.

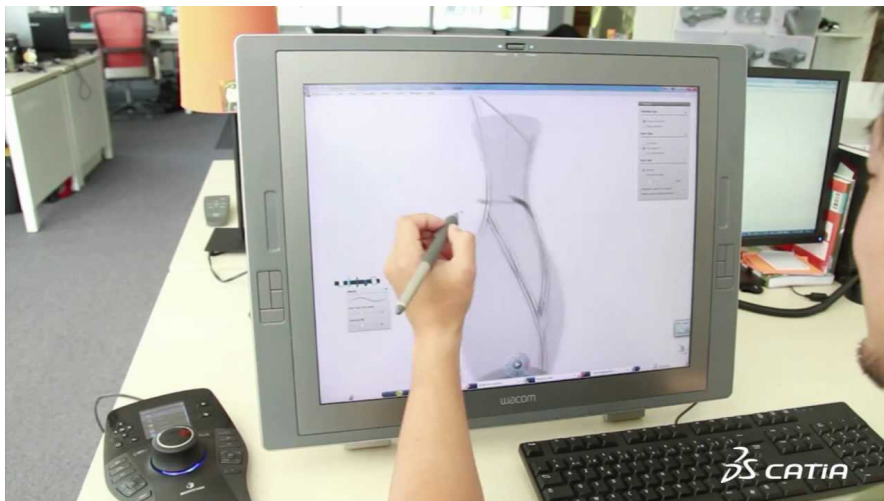


FIGURE 3.6 – Outils de dessin dans CATIA utilisé avec une tablette graphique WACOM Cintiq.

Nous proposons une alternative : proposer davantage d'interfaces pour un rapport action perception enrichi

Des interfaces intelligentes apportent une corrélation très riche entre actions de l'utilisateur sur la représentation qu'il conçoit et la perception qu'il en a. Ce couplage entre action et perception est absent du modèle séquentiel. Or, en fonction de ces boucles d'interactions la conception est fortement modifiée. Réaliser des séquences rapides d'action perception autorise une conception ainsi qu'une manipulation de leur représentation instantanée ([92, 93]). Dans le sillage des sciences informatiques, une discipline que nous mobiliserons également au cours de ce travail est particulièrement pertinente. Il s'agit de la réalité virtuelle qui est progressivement devenue incontournable pour certaines phases du processus, notamment les validations finales et les tests ergonomiques. Elle offre en effet une immersion améliorée du concepteur avec le produit qu'il conçoit, ce qui permet des boucles d'action perception radicalement enrichies. En revanche, son coût et la difficulté à l'interfacer avec les produits existants explique sa diffusion encore limitée. Pourtant cette ressource demeure très prometteuse pour l'amélioration des capacités des outils.

Définition de la réalité virtuelle

D'après *Le traité de la réalité virtuelle* [39] :

Dans l'esprit du grand public, la réalité virtuelle est à mi-chemin entre fantasme et technologie, entre rêve et réalité. Il est évident qu'une certaine confusion entoure cette discipline, la première étant incluse dans l'oxymore de sa dénomination, qui associe deux termes en apparente opposition ([39]). La réalité virtuelle ne peut être envisagée que depuis peu, grâce à l'augmentation importante de la puissance intrinsèque des ordinateurs. En particulier, la possibilité de créer en temps réel des images de synthèse et de procurer des interactions immédiates entre l'utilisateur et le monde virtuel comme le montre la Figure 3.7. Des évolutions techniques ont certes permis son essor mais ce sont aussi ces dernières qui contraignent sa portée, du fait des limites inhérentes actuelles de la technique.

Dans le domaine des sciences et des techniques, la réalité virtuelle provient du domaine des Sciences et Techniques de l'Information et de la Communication. Pour les sciences humaines et du vivant, l'homme «utilisateur» est placé au cœur de la démarche de développement des technologies de la réalité virtuelle. Une telle assertion implique une forte synergie avec de nombreuses disciplines



FIGURE 3.7 – Un utilisateur au milieu d’un Cave Automatic Virtual Environment trois faces.

relevant de la psychologie expérimentale, de la psychologie cognitive, en passant par les sciences du comportement, l’ergonomie, jusqu’à la physiologie ou la neurobiologie.

Ces interfaces immersives semblent être des instruments appropriés et décisifs afin de surmonter le «design gap». Les interfaces des outils numériques concentrent l’attention de nombreux chercheurs qui tentent d’augmenter la «présence» de l’utilisateur dans le monde virtuel ([95]). Les possibilités techniques se multipliant, les concepteurs disposent ainsi de ressources diversifiées. De plus, la prolifération d’articles scientifiques sur l’opportunité de cette technique pour la conception ([119, 36, 15, 39, 38]) sur le sujet laisse à penser que les concepteurs disposeraient d’ores et déjà de moyens conséquents pour adresser ce «design gap». Cependant, il reste à garantir que ces tentatives soient compatibles avec les suites de conception existantes. Dans le cas contraire, une telle incompatibilité imposerait la réinvention complète ainsi que l’adoption de suites inédites, ce qui supposerait l’émergence improbable d’entreprises proposant de tels logiciels. Alors que de nombreux chercheurs tentent d’exploiter cette fabuleuse ressource proposant une augmentation spectaculaire des capacités d’interaction, un mythe de la coprésence, dans des environnements génériques au sein desquels tout le monde pourrait être concepteur et créatif (usager, managers, décideurs, ingénieurs et bien entendu designers industriels) semble en parallèle se constituer. De nombreuses publications explorent ce thème ([8, 17, 65, 13, 73, 115, 30]).

3.1.2 Sciences cognitives

Définition

D'après Handbook of categorization in cognitive science ([20]) :

Les êtres humains sont considérés comme des organismes sensori-moteurs ([43]). Plus précisément, nous interagissons avec notre environnement *via* des récepteurs sensoriels et nos organes moteurs. Les diverses manières d'interagir que nous mobilisons, en rapport avec le contenu précis de cet environnement, est régi par notre cognition. Les sciences cognitives peuvent être définies comme la discipline scientifique qui étudie les pensées et les cerveaux, qu'ils soient réels, artificiels, humains ou animaux ([80]).

La compréhension des aspects cognitifs dans les processus de raisonnement, et de conception en particulier semble cruciale ([2]). Ainsi, au sein des travaux en conception, la question des raisonnements de conception à adopter est notamment étudiée. Bien plus, les déviations du jugement par rapport à un jugement rationnel sont centrales en psychologie cognitive, qui les appelle les «biais cognitifs». Le terme «biais» se réfère au fait que l'erreur commise est souvent systématique et ses déterminants reposent sur des mécanismes mis en jeu dans le traitement cognitif appliqué à la situation donnée. Les travaux en psychologie cognitive ont aujourd'hui étendu l'étude des biais cognitifs individuels aux problèmes de créativité. De tels travaux ont mis en évidence l'existence d'effets de fixation dans des situations de conception ([97]). Diverses études ([1, 96, 55]) ont montré comment les individus s'appuient sur leurs connaissances existantes et sur des attributs génériques pour répondre à des tâches créatives, conduisant à l'exploration restreinte de la trajectoire «de moindre de résistance» ([117]), c'est-à-dire la stratégie la plus couramment employée, illustrée en Figure 3.8. Ce biais cognitif est conditionné par l'activation spontanée de connaissances relatives aux solutions « classiques » du problème donné, et contraint l'exploration de solutions alternatives. Les fixations qui surviennent au cours du processus créatif sont parfois durcies par les outils numériques de conception. Ces derniers ont en effet tendance à chaque étape à exiger une précision renforcée des représentations. Une telle sollicitation peut ainsi avoir des conséquences néfastes dans la mesure où cette nécessité de décision diminue les ressources de conception dans le schéma séquentiel classique.

Au sein du processus séquentiel de conception, la défixation ne s'effectue que lors du «creative front end»

Le processus séquentiel présuppose qu'une longue phase d'exploration suivie par une phase de convergence sont nécessaires afin de se fixer progressivement

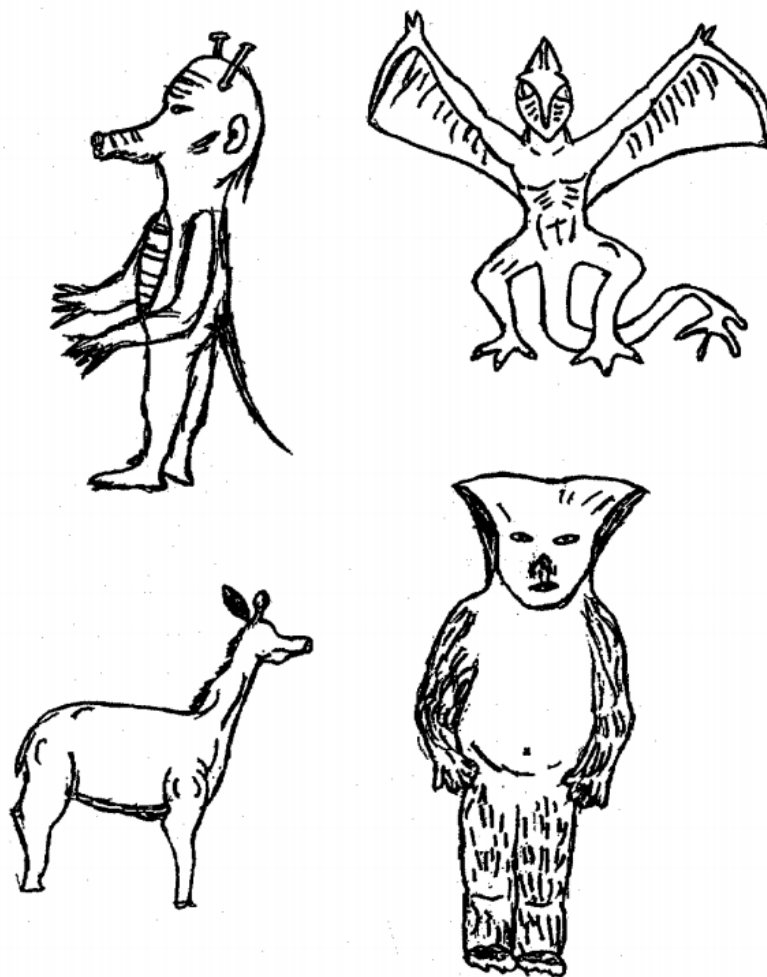


FIGURE 3.8 – Exemples de créatures extra-terrestres proposées lors d'expérimentations sur la créativité ([116]). On peut remarquer le grand nombre de traits communs qu'elles partagent avec les créatures terrestres (yeux, oreilles, queue, ailes...).

sur l'identité de l'objet. Dans ce cas, la défixation n'est envisageable qu'en tout début de processus.

Nous proposons une alternative : des phases spécifiques de défixation pourraient être proposées aux concepteurs à la demande, au cours de développement du produit

Les cours d'introduction au Bauhaus proposaient des ateliers spécifiques d'apprentissage de la créativité qui reposaient sur des étapes de défixation. Les professeurs se sont concentrés sur les fixations par des « clichés » et sur la perception souvent trop limitée de leurs étudiants en début de cursus. Ils ont ainsi identifié plusieurs obstacles à la créativité. Les concepteurs sont fixés par des associations communes des attributs de l'objet. Les formes, les matériaux, les textures et la signification sont trop fortement et de manière trop déterminée corrélés. Le « cliché » (tel que la chaleur du bois ou la froideur du métal) est un risque fort pour les designers industriels qui menace leur capacité à reconsidérer l'identité des objets ([69]). Dans ce cadre, Johannes Itten a suggéré des théories pour combattre les fixations dans sa théorie des couleurs. Il propose notamment de libérer la fixation qui lie les couleurs aux formes ([54]).

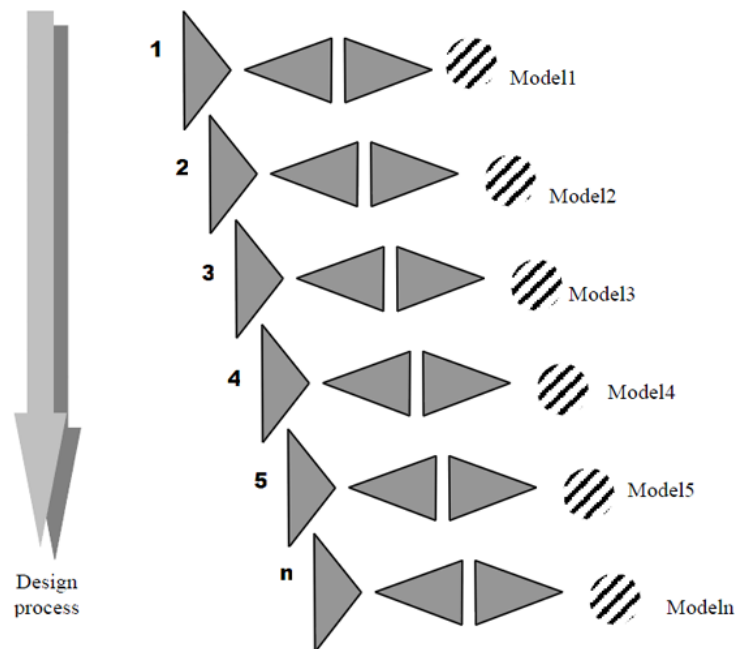


FIGURE 3.9 – L'évolution des connaissances durant le processus de conception ([9]).

Bouchard et al. ([9]) proposent un processus de conception au cours duquel chaque étape est initiée par une phase dite générative, illustré en Figure 3.9. Celle-ci consiste en l'élaboration de nouvelles idées et solutions. Il est recommandé aux concepteurs de s'appropriier les points de vue de collègues non concepteurs qui pourront les aider à se défixer grâce à leurs propositions. Les représentations sont également renouvelées à chaque étape ce qui élude la fixation sur une des dimensions de l'objet. Dans le cas des outils numériques de conception, les designers industriels manipulent majoritairement des représentations géométriques, il serait intéressant d'en proposer des inédites, telles que symboliques ou sonores.

Le processus de type séquentiel opère des sélections et des suppressions

Il permet de réaliser une diminution progressive des incertitudes du produit au cours de son développement.

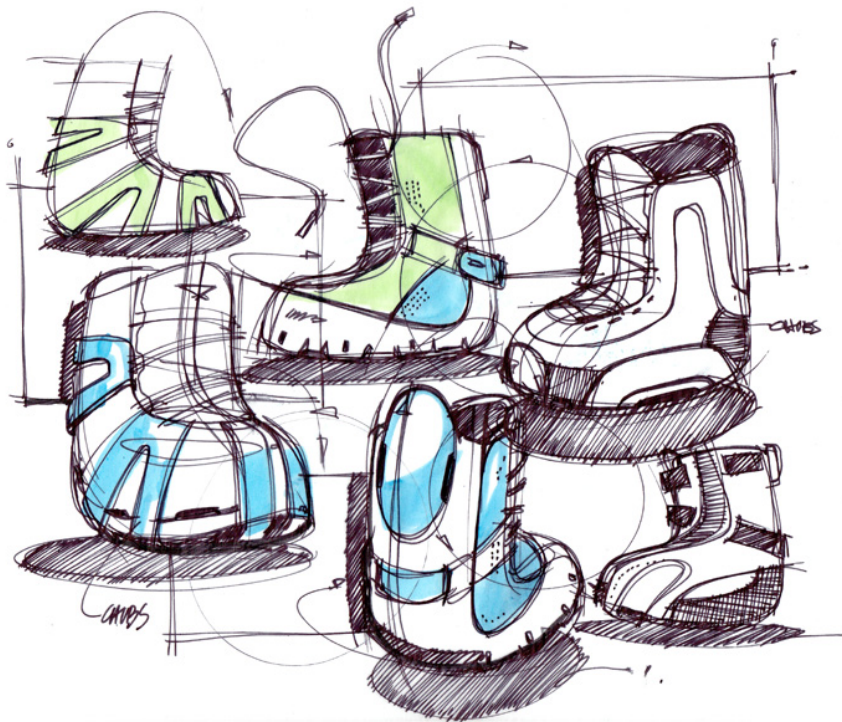


FIGURE 3.10 – Un sketch est capable de présenter un concept sous la forme de multiples alternatives.

Nous suggérons une alternative : un processus qui capitalise un foisonnement d’alternatives

La méthode de validation et de sélection (et donc de réduction des possibilités) n’est pourtant pas la seule qui permet de répondre à des contraintes ou un cahier des charges. Il est parfaitement envisageable de capitaliser toutes les connaissances produites et de proposer à chaque instant plusieurs alternatives qui remplissent toutes le cahier des charges. Ainsi, une contrainte est validée non pas par une solution unique mais potentiellement par une famille de solutions qui répondent toutes au problème. Il reste à élaborer une représentation numérique adaptée qui pourrait s’inspirer de l’exemple des sketches de la Figure 3.10.

Le design gap pose un problème cognitif

Le passage au numérique exige une présentation du concept par des dimensions réduites (géométriques la plupart du temps) et ce, en précisant les propriétés qui auront été volontairement été laissées floues. La phase de numérisation écrase alors toute la richesse du concept pour l’assimiler à un set de représentations très limité correspondant généralement à des dimensions préétablies du produit : cahier des charges, description physique, description logique et description physique. Il s’agit en réalité de transmettre l’environnement du produit et d’autres aspects parfois sous-jacents et non clairement exprimées. C’est en essayant de transmettre uniquement les informations contenues dans la représentation que des informations sont perdues. Le passage aux ateliers de CAO industriels présente ainsi un risque majeur de trahison du concept de modèles très riches, comme celui illustré en Figure 3.11.

Nous proposons une alternative : Le design gap pourrait être contourné si la créativité était intégrée différemment

En développant des processus qui intègrent de la créativité à la demande tout au long du processus, le «design gap» disparaît. Cette assertion est illustrée par l’introduction d’outils numériques de conception dédiés aux artistes 3D qui travaillent dans l’industrie du divertissement. Ainsi, ces outils offrent une grande capacité d’exploration tout en intégrant directement les artistes dans le monde numérique. Avant l’apparition de tels logiciels, ces étapes de conception s’effectuaient avec des moyens traditionnels tels que le «sketching» et le «clay modeling».



FIGURE 3.11 – Rendu d'un modèle 3D réalisé par Alexiall avec le logiciel Zbrush de Pixonologic.

3.1.3 Sciences de gestion

Définition

D’après *La gestion* de Christian Bialès ([7]).

Gestion vient du nom latin *gestio* et signifie : action de gérer, exécution. Ce mot est issu du verbe *gerere* qui veut dire : exécuter, accomplir. Le mot a pris un sens plus ambitieux en devenant le synonyme des termes administration, management, gouvernement ou encore direction. Il leur est même préféré puisqu’il est le terme consacré lorsqu’il s’agit d’études de gestion, de faculté de gestion, de professeurs de gestion et des sciences de gestion. La gestion est à la fois une science sociale, une science morale ainsi que politique, une science appliquée et une technoscience. L’étude centrale de la gestion est l’organisation en général et l’entreprise en particulier. Les sciences de gestion sont d’une importance capitale pour qui veut comprendre et analyser les processus de conception. Ces processus sont l’orchestration et la mise en œuvre de méthodes de travail et d’organisation des équipes professionnelles.

Au sein de notre travail, nous mobilisons les sciences de gestion pour clarifier le lien entre les outils de conception numérique et les performances conceptrices des organisations impliquant des professionnels créatifs qui les utilisent.

Une première remarque pointe que le processus séquentiel organise la conception afin d’obtenir des produits d’une extrême complexité. Le processus séquentiel comporte un grand nombre d’avantages du point de vue des sciences de gestion. Il hiérarchise notamment la conception par professions et spécialités, en offrant une décomposition de toutes les différentes parties du concept.

Nous proposons une alternative : la prise en compte de l’injection massive de connaissances dont le processus de conception séquentiel bénéficie

Ce processus de conception séquentiel a été rendu possible par l’intégration de bases de règles préalablement conçues. Il peut s’agir de bureaux d’études ([68]) ou de laboratoires de recherche scientifiques intégrés aux entreprises. Kline et Rosenberg ([62]) parlent du modèle séquentiel en employant l’expression de modèle linéaire. Selon eux, le modèle linéaire distord la réalité de l’innovation de plusieurs manières. Les itérations sont absentes du processus. Il a tendance à occulter les essais ratés qui sont généralement une partie essentielle du processus, par leur capacité à générer des connaissances. Il a également tendance à ne pas montrer l’influence des découvertes techniques, notamment pourquoi et comment elles sont intégrées dans le processus. Le processus a en réalité besoin d’être fortement innervé tout au long de son déroulement, ce qui est masqué par sa modélisation séquentielle. Pour éviter cet écueil, les chercheurs suggèrent de

rendre l'influence de l'exploration et de la connaissance visible dans un modèle qu'ils notent «chain-linked model», présenté en Figure 3.12.

De plus, il existe aujourd'hui des modèles du type Design Space Value Management ([48]) qui permettent de mettre en évidence l'accumulation et la reconstitution des règles. Il présente simplement les Design Spaces (DS) qui sont les phases d'apprentissage. Les DS sont définies comme des espaces de collectifs qui autorisent la conception. La couche de Value Management (VM) est le lieu de l'accumulation de la connaissance. Cette couche sert de point de départ aux DS et de lieu de capitalisation de ce qui a été appris durant leur exécution. Ce modèle est illustré en Figure 3.13.

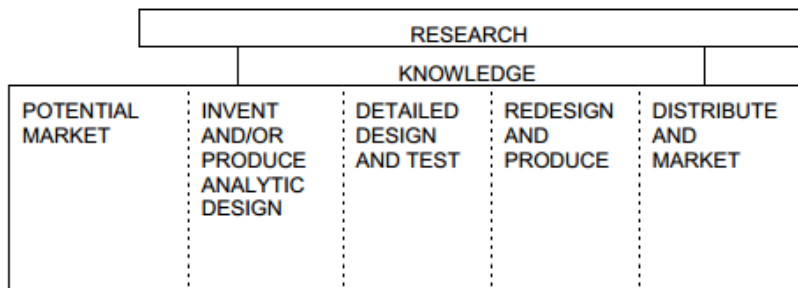


FIGURE 3.12 – Eléments du modèle «chain-linked» qui montrent les relations entre recherche, invention, innovation et production ([62]).

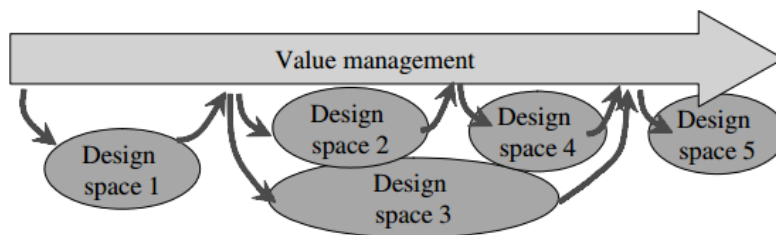


FIGURE 3.13 – Modèle Design Spaces Value Management ([48]).

Le processus de conception séquentiel fabriquent des produits techniques complexes

Le processus de conception séquentiel est en effet particulièrement adapté à l'intégration d'une très grande quantité de connaissances, à condition que celles-ci aient été préalablement générées. Cette prévalence de la technique rend

pourtant secondaire les dimensions sensibles, d'usages, d'ergonomie et de signification de l'objet.

Nous suggérons une alternative : Les designers industriels pourraient jouer un rôle différent dans le processus

Comme le précise Buxton ([16]), le design industriel et l'ingénierie sont bien distincts et requièrent des compétences, mais surtout des styles de management variés. Selon lui, il est inapproprié que les ingénieurs seuls dirigent le processus de conception. Les designers industriels ainsi que les ingénieurs sont nécessaires au processus de conception, mais aucune des deux professions n'est suffisante. L'environnement de conception, est aujourd'hui dominé par les techniques ainsi que les méthodes des ingénieurs. Il est impératif d'établir une collaboration pérenne entre ces deux catégories de concepteurs qui se complètent mutuellement.

Buxton critique également le processus séquentiel actuel ([16]). Si sa proposition oriente encore les interventions du design industriel principalement sur les phases amont, il suggère que les modes d'intervention s'établissent durant toute la durée du processus comme l'illustre la proposition d'évolution introduite en Figure 3.14. Pour ce faire, les designers industriels doivent disposer d'outils adaptés précisément conçus pour leur usage.

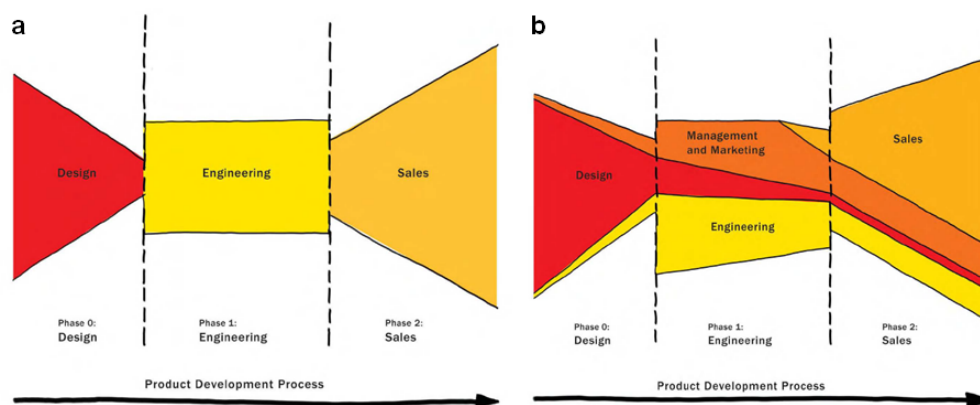


FIGURE 3.14 – Proposition de processus de conception lors duquel les designers industriels pourraient jouer un rôle transversal. (a) Statut initial. (b) Proposition ([16]).

De plus, d'autres concepteurs tels que les artistes 3D partagent des caractéristiques communes avec les designers industriels, notamment au niveau de l'usage intensif qu'ils ont des techniques traditionnelles de représentation telles le «sketching» ou le «clay modeling». Comme déjà évoqué, les artistes 3D disposent de suites numériques complètes spécialement adaptés à leurs besoins. Le

processus de conception qui a supporté leur intégration est également séquentiel, comme le montre la Figure 3.15. Toutefois, comme il a été conçu sur mesure pour cette catégorie de professionnels, il favorise leur créativité.

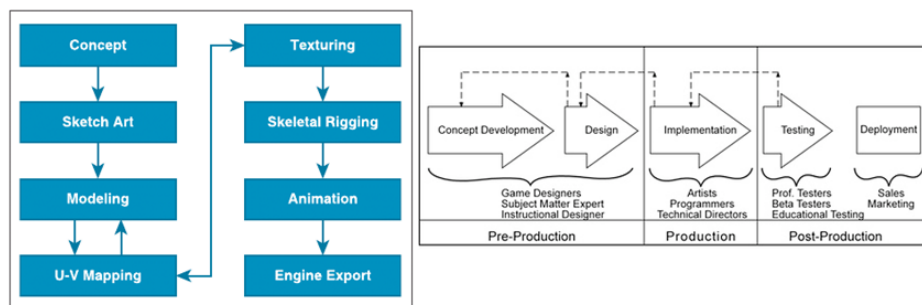


FIGURE 3.15 – Le design process de la création de personnages 3D. La partie qui nous intéresse car elle fait appel à des logiciels de modélisation 3D s'appelle le «modeling» (Suzan Huang).

3.1.4 Théories de la conception

D'après «Product design research and practice : past, present and future» ([102]).

A propos des théories de la conception appliquées à la conception de produit, la littérature récente ne s'accorde pas sur une définition exacte. Dans la pratique industrielle ainsi que dans la recherche académique, une telle spécification dépend souvent de l'orientation fonctionnelle ou de la spécialisation personnelle du chercheur considéré, depuis une perspective marketing, recherche et développement, design industriel et ingénierie qui sont toutes des professions chargées de réaliser des activités liées à la conception de produit ([102]). Les théories de la conception permettent justement de s'affranchir de cette vision professionnelle et d'étudier la conception en tant que telle. Les avancées les plus récentes de la communauté académique étudiant les théories de conceptions montrent un lien fort entre créativité et théories de la conception. Il est ainsi possible d'identifier trois notions principales :

- >Les théories de la conception en tant que telles, modèles formels des raisonnements de conception.
- >Les modèles de raisonnement inspirés des formes d'organisation de l'action collective pour la conception.
- >Les formes d'action collectives qui offrent la possibilité d'adresser les questions de créativité.

> Leur robustesse, à savoir leur capacité à produire des propositions conceptuelles qui résistent aux variations de contexte.

Le processus de conception séquentiel favorise la robustesse et le contrôle de la conception. Ce modèle est issu d'une tradition de conception dominée par l'ingénierie et dérive de modèles de conception systématique «systematic design». Historiquement, ce type de modèles a été initié par des concepteurs tels Redtenbacher qui proposait dès 1848 des abaques (voir Figure 3.16) pour concevoir à la demande des roues à aubes à partir d'un faible nombre de paramètres. Son travail a été systématisé par Pahl et Beitz dans leur ouvrage sur la conception ([84]). Ils décrivent pour la première fois en 1977 la conception comme étant la succession de quatre phases : définition fonctionnelle, définition conceptuelle, définition physique et définition détaillée.

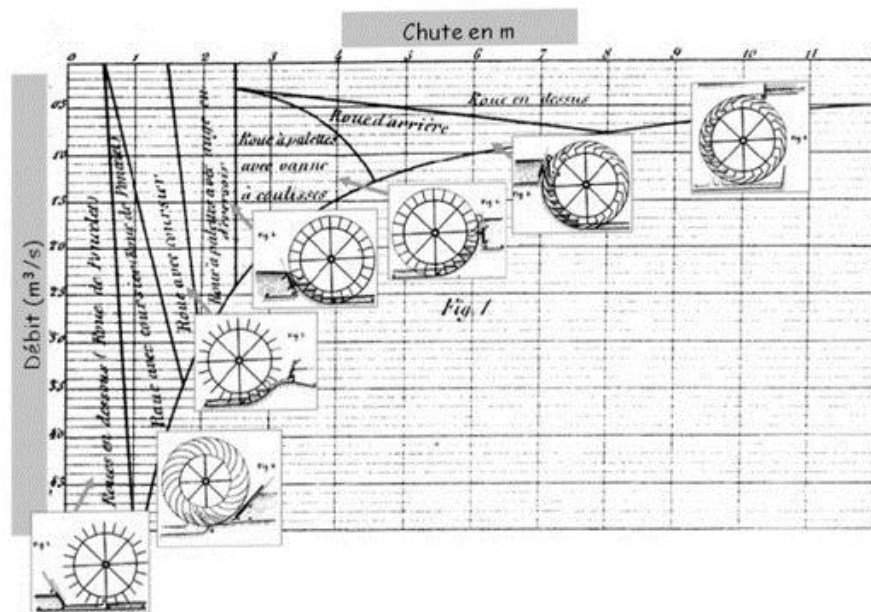


FIGURE 3.16 – Abaque pour le choix du type de roue hydraulique en fonction des conditions d'utilisation. ([67]).

Nous proposons une alternative : l'utilisation de modèles favorisant la générativité

Pahl & Beitz ont élaboré un modèle de la conception qui aurait pu être intégré différemment ([84]). Les quatre phases qu'ils décrivent ont été organisées de façon à favoriser le contrôle et la sélection. Ils précisent notamment que pour de nombreux produits la dimension esthétique est devenue aussi primordiale que celle des fonctionnalités techniques. Ils rappellent que cette approche du processus de conception procède de «l'extérieur vers l'intérieur» et qu'elle nécessite une collaboration continue entre designers industriels et ingénieurs. Ce besoin d'intégration et d'interaction a donc toujours été présent. Nous en déduisons que lors de la simplification du modèle et sa mise en application, notamment par les outils, les organisateurs auraient pu procéder autrement.

D'après Hatchuel et al., l'ensemble des théories contemporaines de la conception ont tenté de dépasser certaines fixations ([50]). Nous pouvons citer General Design Theory (GDT) de Takeda & Yoshikawa ([103]), l'Axiomatic Design (AD) de Suh ([99]), Coupled Design Process (CDP) de Braha & Reich ([12]), Infused Design (ID) de Shai & Reich ([94]) et la théorie CK d'Hatchuel & Weil ([47]). L'évolution des théories de la conception peut être interprétée comme une volonté de développer leurs capacités génératives tout en conservant leur robustesse. Par ailleurs, l'intégralité de ces théories est générative. Il aurait ainsi été parfaitement envisageable de favoriser cette dimension dans les processus industriels.

3.1.5 Synthèse

Les quatre disciplines académiques qui traitent des outils numériques de conception invitent à enrichir le modèle séquentiel. Elles reconnaissent sa valeur mais identifient chacune des alternatives. Leur regard ouvre la voie à des processus variés qui permettraient d'intégrer la créativité selon des modalités différentes de la juxtaposition. Afin de construire ces manières inédites d'intégrer la créativité dans les processus industriels, nous allons proposer un modèle capable d'implémenter certaines des suggestions fournies par ces multiples disciplines. Pour ce faire, nous allons modéliser des ateliers de conception aux propriétés intéressantes en exploitant les descripteurs qu'offrent les sciences informatiques, cognitives, de gestion et les théories de la conception.

Chapitre 4

Résultats

4.1 Etude et modélisation des raisonnements de conception dans deux ateliers de conception numériques

4.1.1 Sélection et spécificités des ateliers numériques

Les deux ateliers numériques que nous allons modéliser ont été sélectionnés *via* plusieurs critères. Ils sont régulièrement utilisés par les designers industriels dans le cadre de leurs activités professionnelles, ils possèdent des caractéristiques originales sur lesquelles nous reviendrons et ils jouent également un rôle majeur dans le processus de conception global. Afin de faciliter la lecture de la suite de ce manuscrit, nous expliquons dès à présent le contexte et le fonctionnement de la suite logicielle CATIA qui est au centre de notre étude.

Cadre et fonctionnement de la suite logicielle

L'étude de ces deux ateliers de conception spécifiques implique une compréhension fine du fonctionnement d'une suite logicielle complexe. Afin de ne pas perdre le lecteur nous ne rentrerons pas dans les détails.

Nous travaillons sur la suite de conception logicielle CATIA qui est une des sous-parties d'une solution PLM/PDM complète. Cet outil PLM/PDM sert à concevoir des produits, de leurs premières étapes d'existence à leur mise sur le marché en passant par la gestion des pièces détachées une fois commercialisées, la conception des usines ou encore la simulation des lieux de vente. La suite de conception CATIA est un environnement de modélisation qui a été initialement élaboré pour créer des représentations tridimensionnelles des produits en cours de conception puis a progressivement été capable d'intégrer d'autres types de modélisations.

Les modélisations autorisées par la suite CATIA décrivent le produit selon

une méthode qualifiée de RFLP (Requirements, Functional, Logical et Physical). Il existe également des ateliers spécifiquement conçus pour manipuler un type de représentation. Les ateliers appartenant à un même type de représentation peuvent manipuler des modèles aux propriétés très distinctes. Ainsi en plus du modèle, le concepteur dispose par atelier d'un type particulier d'outils. Cette décomposition est illustrée en Figure 4.1.

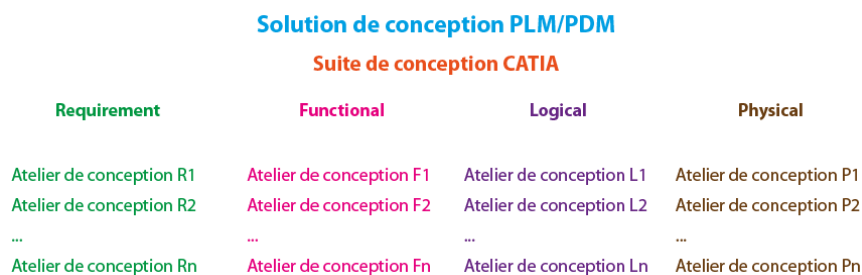


FIGURE 4.1 – Décomposition de la suite logicielle CATIA en ateliers destinés à travailler sur des types de représentations spécifiques.

Contrairement à d'autres environnements de conception concurrents polarisés exclusivement sur la géométrie des produits, CATIA autorise la manipulation un grand nombre de représentations, générées par des ateliers variés, sans pertes liées à d'éventuelles conversions.

Requirements (R) :

Ces ateliers s'adressent à l'ensemble des attributs, caractéristiques et propriétés souhaitées du concept cible. Ces éléments sont généralement exprimés par le cahier des charges. L'objectif des ateliers traitant les Requirements est de transcrire dans le logiciel ces propriétés désirables de la manière la plus précise et. Par exemple, dans le cas de la conception d'une automobile :

>Consommation de carburant de 5L/100 Km.

>Un modèle spécifique de pneu.

Functional (F) :

Ces ateliers se présentent sous la forme de schémas blocs qui peuvent être enrichis d'images ou de textes. Ces schémas blocs renseignent quant aux fonctions du produit nécessaires pour obtenir les Requirements précédemment cités et peuvent être connectés par des liens qui représentent des circulations d'informations. Par exemple :

>Stocker le carburant

>Assurer la liaison du véhicule avec le sol

Logical (L) :

Ces ateliers présentent l'architecture logique du produit en cours de conception.

Deux formes sont ainsi proposées :

>Schémas blocs 2D

Tout comme dans le cas du *Functional*, des schémas blocs représentent les fonctions logiques du système ainsi que les liens qu'ils partagent. Ces schémas blocs sont directement corrélés à des liens d'implément aux pièces physiques. Il est ainsi possible de vérifier instantanément si tel ou tel câblage existe bien géométriquement, ou si tel système a bien été modélisé et implanté dans la maquette numérique.

>Pièces 3D

Afin de déterminer des encombrements imprécis de divers systèmes physiques aux propriétés encore mal envisagées, il est possible d'utiliser la description logique 3D. Une pompe pourra ainsi être représentée sous la forme d'un parallélépipède ou un réacteur comme un cylindre. La modélisation des «zones» immatérielles possédant certaines propriétés (zone chaude par exemple) ou étant enregistrées comme «équipements» (équipements de navigation par exemple) peuvent être représentées comme des pièces physiques. L'intérêt principal de cet atelier de «*Logical*» en 3D est de réaliser des allocations d'espace pour des équipements aux propriétés encore inconnues.

Physical (P) :

Ce dernier niveau de description du produit concerne la modélisation géométrique. C'est historiquement celle qui fût la première à être adressée par CATIA et par là même son domaine d'excellence. Pour des raisons pragmatiques dûes au vocabulaire utilisé dans la suite, nous emploierons les termes représentation «Physique» ou représentation «géométrique» comme synonymes. Il existe à l'heure actuelle une multitude d'ateliers orientés métier dans CATIA, dont un certain nombre cible spécifiquement les designers industriels. Nous citons ici les principaux étudiés au sein de notre étude ainsi que leur principal champ d'utilisation :

>CATIA Part Assembly : Assemblage de pièces géométriques.

>CATIA Imagine And Shape : Modélisation surfacique par méthode de subdivision.

>CATIA Generative Shape Design : Modélisation surfacique, des outils volumiques sont également disponibles.

>CATIA Icem Surface : Modélisation de surfaces Classe A.

>CATIA Live Shape : Modélisation volumique disposant d'une ergonomie favorisant la productivité.

Par ailleurs, il existe des ateliers permettant de travailler l'aspect global du produit (CATIA Live Rendering), la simulation numérique (SIMULIA) ainsi que la tâche de «compose» (CATIA Live Compose et CATIA Part Assembly). De plus, chaque atelier autorise la manipulation d'un ou plusieurs types de modèles.

Chaque atelier propose une collection d'outils comme illustré en Figure 4.2. Les outils sont conçus pour agir exclusivement sur un type de modèle, mais des outils similaires peuvent par conséquent être proposés au sein d'ateliers divers.



FIGURE 4.2 – Un atelier propose des outils qui permettent d'agir sur une représentation numérique (également appelé modèle numérique).

La suite CATIA contient des dizaines d'ateliers différents en fonction de ses configurations et propose donc des centaines d'outils. Ajoutons que certains outils réalisent des actions de transformation similaires sur l'objet et présentent parfois des apparences variées en fonction des ateliers.

Structure et organisation des données

De la même façon qu'il nous a fallu appréhender les multiples niveaux d'abstraction d'un système par les descripteurs RFLP, il est nécessaire d'assimiler la segmentation des pièces physiques dans CATIA. Pour les utilisateurs, le degré de complexité de ce découpage est extrême et ils ne maîtrisent généralement que les segmentations qu'ils ont coutume d'utiliser, ce qui correspond, pour la plupart des cas à un ou plusieurs ateliers particuliers.

Nous nous concentrons volontairement sur le *Physical* (cf. Figure FigArbre-ConceptionCATIA). Sur cette figure est représenté l'arbre de conception au sein de CATIA. Il conserve les étapes de conception ainsi que les diverses fonctions qui forment la représentation géométrique par phases successives. Ces fonctions sont appelées «features». L'arbre de conception permet de rejouer à tout instant la séquence de conception et de modifier les paramètres des «features». De plus, il sauvegarde également la structure de données du logiciel. En effet, afin de simplifier la gestion de modèles virtuels très complexes, les concepteurs sont en mesure de décrire leurs objets de conception en les caractérisant. Il existe ainsi plusieurs niveaux de description.

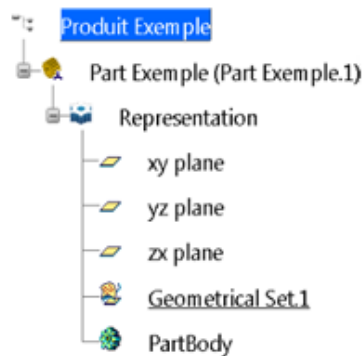


FIGURE 4.3 – L’arbre de conception dans CATIA, faisant apparaître la structure de données : le Produit, la Pièce 3D, la représentation, le Geometrical Set et enfin la PartBody.

Le Product :

Il s’agit d’un conteneur stockant l’intégralité des opérations et segmentations réalisées sous CATIA. Il est divisé selon l’organisation RFLP, les différentes parties pointant les unes vers les autres *via* des liens d’implément. La structure Product peut également inclure d’autres produits, comme par exemple, le Product voiture contient le Product pneus.

Le 3D part :

Il s’agit d’un conteneur de pièces Physical. Une Representation unique est alors accessible. Une 3D part peut être convertie en Product.

La Representation :

Il s’agit d’un conteneur d’entités géométriques incluant les Features de conception, à savoir les opérations effectuées par le concepteur. La Representation est référencée par rapport à un repère dont les principaux plans sont par défaut visibles.

Geometrical Set :

Il s’agit d’un conteneur de Features volumiques ou surfaciques. Les Features fonctionnent sur un mode parent-enfant non hiérarchique. A l’origine, ce conteneur a été développé pour l’atelier CATIA Generative Shape Design qui gère plus spécifiquement la conception de surfaces. Les Features sont généralement associées à des outils. Il s’agit de fonctions à paramètres appliquant des transformations ou de la création de matière. Les trous, chanfreins, congés ou encore extrusions sont ainsi des Features.

Part Body :

Il s’agit d’un conteneur de Features solides ou surfaciques. Les Features fonctionnent sur un mode parent-enfant hiérarchique. Ainsi, le résultat visible à l’écran correspond aux opérations effectuées dans un ordre descendant et l’ensemble des entités visibles appartiennent à la même entité. Ce conteneur a ori-

ginellement été conçu pour l'atelier CATIA Part Design qui est spécialisé dans la conception de pièces mécaniques.

Schématiquement, lorsque la précision n'est pas nécessaire nous parlerons d'entités afin de décrire les objets géométriques manipulés au sein du logiciel. Il peut s'agir d'un volume, d'une surface ou encore d'un élément 2D (ligne, point ou esquisse par exemple). En revanche, nous emploierons le mot outil pour décrire les Features.

Sélection et définition des ateliers

Pour générer le nouveau modèle, nous allons mobiliser deux outils archétypaux de la conception. Le premier atelier joue un rôle central dans toute suite de CAO, il s'agit d'un atelier d'assemblage destiné à positionner des représentations géométriques dans l'espace. Il a été conçu pour assurer, au fur et à mesure de la conception, l'assemblage des diverses pièces qui constituent la représentation virtuelle du produit (appelé couramment Digital Mock Up, maquette numérique).

Le second est un outil de modélisation original créé pour adresser les besoins des designers industriels et qui présente des caractéristiques intéressantes pour la suite de notre étude. Il a été élaboré pour les designers industriels. Cet outil propose au travers d'interfaces inspirées de logiciels plus orientés «artistes» une maîtrise de la « qualité de surface ». et ce, au sein d'un environnement industriel.

4.1.2 Atelier CATIA Part Assembly et tâche de «compose»

Présentation et propriétés de l'atelier de compose

En langage CAO, ce terme de «compose» signifie «la tâche d'assemblage qui se manifeste lorsque plusieurs sous-ensembles géométriques constitutifs d'un produit en cours de conception ont une définition suffisante des propriétés souhaitées du concept cible». La Figure 4.4 expose un cas d'assemblage dans un atelier dédié. Le concept cible est le produit en cours de développement. Nous le qualifions de cible car les concepteurs ne l'ont pas encore doté de l'ensemble des propriétés dont il devra disposer, qui correspond au cahier des charges.

La tâche de «compose» est un des exercices incontournable du processus de conception dans les ateliers numériques. En effet, les produits industriels sont constitués d'un très nombre important de pièces : 1000 environ pour un aspirateur, 10000 pour une voiture, 100000 pour un avion et jusqu'à 1000000 pour un bateau. Ces pièces, une fois assemblées, composent la maquette numérique

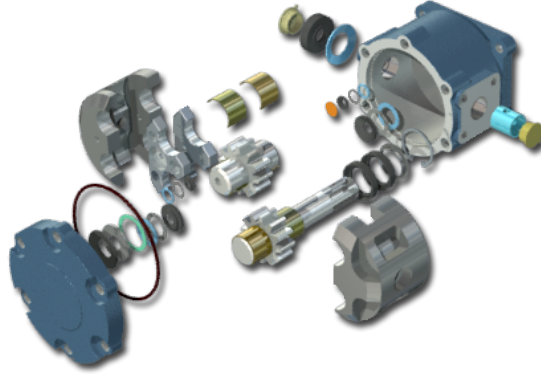


FIGURE 4.4 – L’assemblage sur l’IronCAD Compose Pro software.

complète. Les intérêts de la décomposition des produits en sous-parties sont multiples et renvoient à plusieurs disciplines académiques (théorie de la conception, sciences de gestion et management notamment) que nous ne traiterons pas dans de cette partie. Nous donnons néanmoins quelques cas pour lesquels une telle dissociation joue un rôle primordial :

- > L’utilisation de plusieurs matériaux pour créer un produit.
- > La simplification de problèmes rencontrés en les divisant en sous-problèmes plus simples à résoudre.
- > La décomposition des problématiques techniques par métiers.
- > La sous-traitance facilitée de parties du produit.
- > La fabrication de pièces complexes en les fractionnant.

Cette tâche de positionnement relatif d’entités peut être effectuée au sein de la quasi-totalité des ateliers de la suite logicielle CATIA propres à déplacer et à référencer du contenu 3D. L’intérêt principal de cet atelier CATIA Part Assembly est que le concepteur est en mesure de manipuler la structure de données au niveau du produit alors que les autres ateliers se positionnent plus généralement au niveau de la conception de pièces et de la manipulation d’entités. De plus, cet atelier propose des fonctions spécifiques :

- > Des outils de positionnement puissants et précis.
- > Des outils de déclaration de publications. Les publications accentuent les zones d’assemblage des entités telles que des faces, des arrêtes ou encore des trous.
- > Des outils d’évaluation validant notamment les tolérances.

Afin de comprendre le fonctionnement de cet atelier ainsi que les modes de raisonnement qu’il implique, nous identifions deux situations représentatives

des activités des designers. Elles sont extraites de l'observation de designers industriels du Design Studio chez Dassault Systèmes, des documents de travail qu'ils ont généré sur les activités de leurs confrères ainsi que d'entretiens avec des concepteurs créatifs variés que nous avons effectués.

1/ Première étude de cas : «l'assemblage d'évaluation» «L'assemblage d'évaluation» est un processus visant à évaluer une conception satisfaisante des différentes pièces d'un produit en les assemblant. Lors de ce processus, le concepteur est capable de vérifier les dimensions géométriques des sous-ensembles afin de les valider ou les rejeter. Il contrôle notamment :

>Le respect des caractéristiques de certaines sous-parties. Si des dimensions sont fausses, le concepteur pourra remarquer des interférences entre celles-ci, ou être averti *via* un message généré par le logiciel. Ceci concerne également la vérification des tolérances portées par les pièces.

>Le respect des caractéristiques de la maquette numérique complète comparativement à celles souhaitées du concept cible. Il est courant que certaines pièces (visserie, câblage, etc. . .) d'un produit soient décomptées et que, lors de l'assemblage complet, un non-respect du cahier des charges (et donc des propriétés du concept cible) soit réalisé en termes de masse totale du produit ou de dimensions par exemple.

>Le montage correct, démontage pour maintenance ou encore réparation du produit. Le concepteur peut ainsi moduler la séquence qui s'accomplira lorsque le produit physique sera effectivement assemblé. Il est en mesure par exemple de constater que l'opérateur ne disposera pas de la place nécessaire pour introduire une pièce ou que telle vis ne peut pas être intégrée car elle requiert une manipulation trop complexe.

L'objectif de cet «assemblage d'évaluation» est de coordonner une vérification des conceptions ayant déjà été effectuée pour les sous-parties. Il s'agit de «la levée des indéterminations du concept cible afin de disposer des connaissances nécessaires pour poursuivre le processus de conception global ou d'acter la fin de la conception numérique». De par ce type d'assemblage, les propriétés d'une pièce, d'un sous ensemble de pièces ou de la totalité des pièces modélisées du futur produit sont éprouvées.

Deuxième étude de cas : «l'assemblage de création» «L'assemblage de création» concerne l'ensemble des tâches qui visent à une définition progressive du concept cible par l'utilisation ainsi que la modification de ses constituants. Il correspond en fait à un atelier d'architecture. Les concepteurs sont ainsi capables d'agir sur les règles de décomposition du produit et par là même de concevoir son architecture. Certaines pièces peuvent avoir des propriétés géométriques connues

alors que leur disposition spatiale relative reste à déterminer. Le concepteur doit alors ordonner ces sous-parties afin de satisfaire les propriétés du concept telles qu'elles ont été préalablement définies ou simplement explorer les différentes variantes possibles comme le représente la Figure 4.5.

L'architecture du futur produit, c'est-à-dire la position relative de ses principaux éléments est conçue par de tels types d'assemblage. Ils s'effectuent généralement à partir de «boîtes d'encombrement» ou en mobilisant des modèles déjà conçus de pièces constituant le produit.

Finalement, quel que soit le type d'assemblage, d'évaluation ou d'architecture considérés, si le concepteur estime l'architecture du futur produit conforme alors cette dernière peut être validée et la conception poursuivie. Si ce n'est pas le cas, il pourra mobiliser à nouveau un atelier de modélisation spécifique pour modifier la ou les sous-parties concernées, ou poursuivre l'itération afin de déterminer une architecture satisfaisante. Une telle dichotomie aide à percevoir la plasticité de cette tâche de «compose» qui adresse des objectifs variés. Il est donc nécessaire de prendre en compte sa finalité (évaluation ou architecture) d'un point de vue de la théorie de la conception pour l'appréhender. Nous identifions que l'assemblage d'architecture est une étape cruciale de la conception, qui révisé drastiquement la configuration spatiale d'un produit.

Modélisation de l'atelier

Après avoir détaillé la tâche de compose, nous allons dorénavant la modéliser en générant un nouveau modèle. Nous avons vu que l'atelier CATIA Part Assembly améliore la définition géométrique du concept. Cet atelier manipule des représentations de haut niveau comme des structures produit, mais également de bas niveau, telles des pièces ou simples entités. Afin de modéliser les raisonnements de conception à l'œuvre dans cet atelier, nous allons retenir la notation suivante :

>X représente le produit en cours de conception que nous appelons concept en reprenant le vocabulaire d'Hatchuel & Weil ([47, 49]). Il est équivalent à la somme des représentations qui le décrivent, numériques ou non. De cette somme de représentations du produit il est ainsi possible de déduire ses propriétés briguées (souvent sous la forme d'un cahier des charges) et ses propriétés courantes qui correspondent à l'ensemble des propriétés arrêtées à un instant donné.

>Le concept est décrit dans la suite logicielle de conception CATIA sous la forme d'un modèle intégrant ses différentes représentations RFLP. A ce propos, nous ne nous intéressons volontairement pas au niveau de description qui correspond au niveau de la solution de conception PLM/PDM. Nous le notons $M_{catia}(X)$

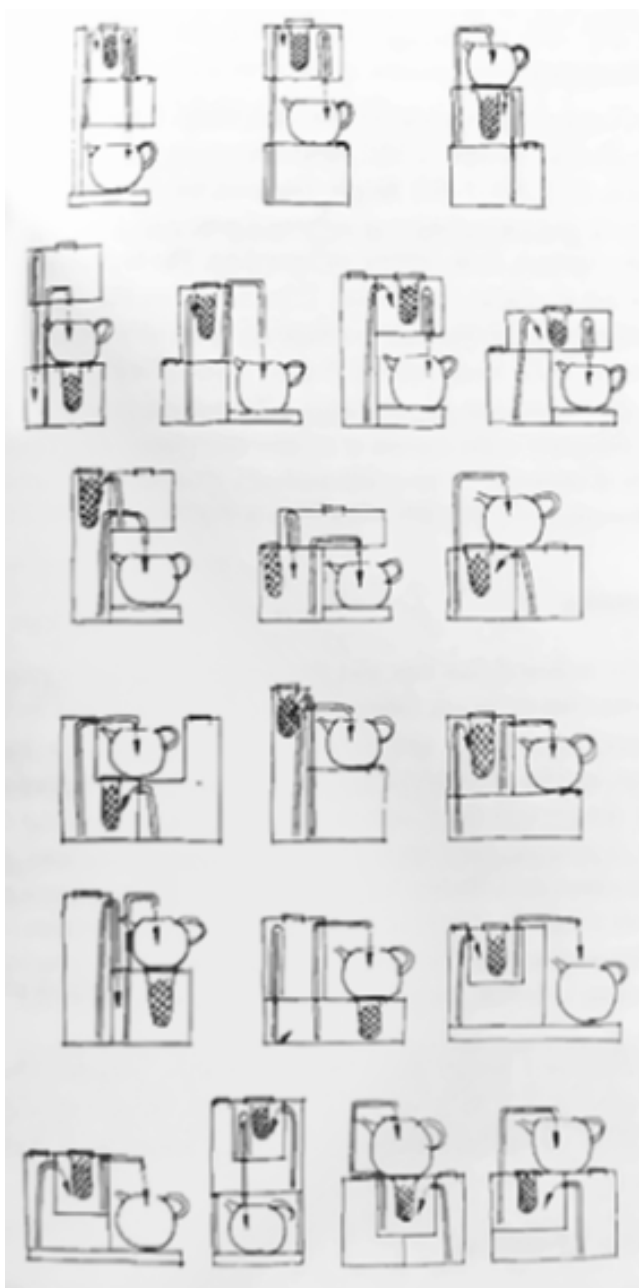


FIGURE 4.5 – Assemblage d'architecture lors duquel des éléments déjà conçus (carafe, sachet de thé et réservoir d'eau) sont positionnés les uns par rapport aux autres ([84]).

qui correspond en fait à $Mcatia(X) = R(X) + F(X) + L(X) + P(X)$.

>P(X) est la somme des représentations géométriques du concept. Les représentations géométriques du concept figurent l'ensemble des représentations sauvegardées au sein du logiciel qui décrivent géométriquement les pièces et sous parties du modèle. L'assemblage est l'étape qui consiste à positionner ces différentes représentations dans l'espace les unes par rapport aux autres.

>De plus, l'atelier mobilise une ou plusieurs de ces représentation pour modéliser le concept dans un format spécifique, que nous notons $Matelier(X)$. Nous simplifions volontairement les cas où les ateliers utilisent plusieurs types de formats.

Dans le cas du compose, le $Matelier(X)$ est donc une somme de représentations géométriques qui en cours d'assemblage constituent un nouveau modèle en cours de fabrication. Nous représentons les notations précédentes au sien de la Figure 4.6.

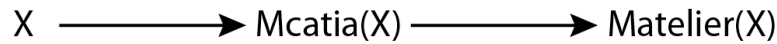


FIGURE 4.6 – Modélisation du concept X à un stade précis de développement sous forme d'une représentation dans CATIA notée $Mcatia(X)$ puis dans un atelier de CATIA.

Chaque flèche indique une étape de modélisation spécifique du concept. La première flèche détermine quelles sont les propriétés du concept qui sont bien modélisables dans la suite logicielle. Si certaines sont très bien adressées (dimensions géométriques par exemple) d'autres, telles les aspects symboliques, ne sont pas intégrables. Pour quelques cas, la modélisation de CATIA ne permet pas d'accéder de façon optimale au modèle de l'atelier (atelier de rendu par exemple). Au cours de la capitalisation au sein des différents modèles ou au niveau du concept lui-même, les représentations évoluent. Nous employons une notation sous la forme de «prime» lorsque nous caractérisons les évolutions afin de souligner ces distinctions, illustré en Figure 4.7.

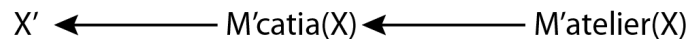


FIGURE 4.7 – La représentation modélisée dans l'atelier a évolué. Il s'agit donc d'un nouveau modèle, noté $M'atelier(X)$. Ce nouveau modèle est intégré ensuite dans la suite, d'où $M'catia(X)$. Ce nouveau modèle correspond donc à cet instant précis à l'évolution du concept X'.

De plus, les ateliers de conception autorisent la manipulation de modèles dont l'ensemble des paramètres ne seront pas réintégrables dans la suite logicielle. Cet effet est encore plus criant lorsque des logiciels incompatibles sont employés, problème normalement résolu par la conception au sein d'une suite intégrée. Enfin, la modélisation du concept dans la suite logicielle est parfois insatisfaisante pour faire évoluer des propriétés du concept.

En considérant que les modèles ainsi que le concept évolue après chaque étape passée dans un atelier, le modèle suivant est proposé en Figure 4.8 :

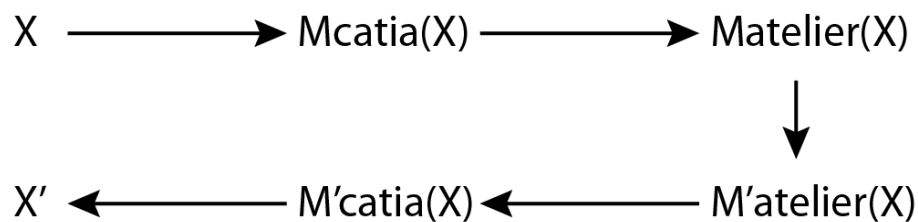


FIGURE 4.8 – Modèle complet montrant les allers retours entre les diverses représentations du concept et le concept lui-même.

Le processus de conception du point de vue du concept et du point de vue de sa modélisation dans la suite industrielle apparaît alors comme représenté dans la Figure 4.9 :

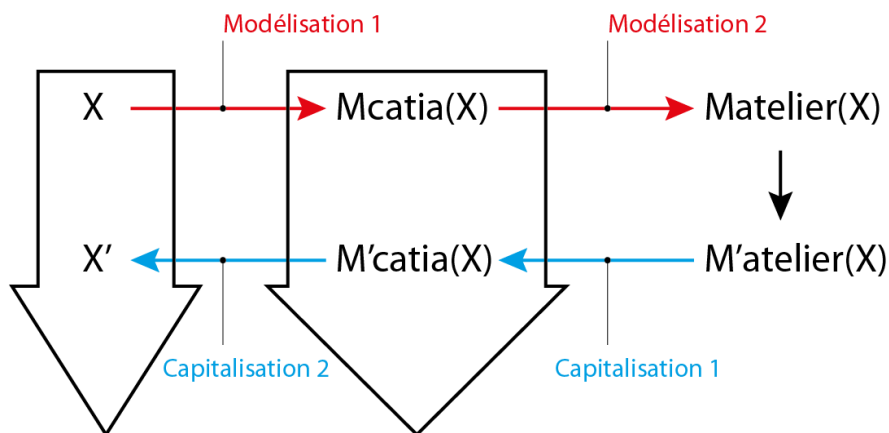


FIGURE 4.9 – Le modèle du processus de conception dans les outils numériques.

Ce nouveau modèle met en évidence :

>La flèche de progression du concept est bien distincte de celle de progression

de la somme de ses représentations dans la suite numérique.

>Chaque étape de modélisation (flèches rouges) et de capitalisation (flèches bleues) n'est pas toujours réalisée de manière transparente. Il s'agit bien d'étapes en tant que telles au sens où les propriétés du concept ou ses représentations peuvent être modifiées et ce, même contre la volonté du concepteur.

>La capitalisation ne se produit pas systématiquement. Lors de certaines étapes le concept n'évolue pas hors de la suite logicielle.

4.1.3 Atelier CATIA Imagine & Shape

Présentation et propriétés de l'atelier de modélisation

CATIA Imagine And Shape (IMA) est un des nombreux ateliers de la suite logicielle CATIA Systèmes. Ce produit a été commercialisé en 2005, pour cibler une catégorie d'utilisateurs précise, les designers industriels qui conçoivent les propriétés formelles des produits. Au sein des entreprises industrielles qui utilisent CATIA en tant que logiciel de conception, ce nouvel atelier a été une véritable révolution pour ses utilisateurs et les concepteurs avec lesquels ils collaborent. Cet atelier propose de manière intégrée dans CATIA des outils pour manipuler intuitivement et simplement des représentations géométriques. IMA fournit ainsi un cadre de travail particulièrement apprécié des designers industriels en intégrant :

>Un modèleur mathématique puissant.

>Un nombre limité de fonctions pour une totale liberté de formes obtenues, et notamment des primitives.

>L'utilisation de manipulateurs permettant d'interagir directement avec les objets.

IMA est aujourd'hui employé par un grand nombre d'entreprises à la fois pour réaliser des concepts, procéder à des recherches formelles mais également pour développer directement des produits afin d'accélérer le processus de conception. Nous allons ici détailler les spécificités techniques du modèleur mathématique de l'atelier qui expliquent son succès. Le modèleur mathématique de l'outil est le moteur de représentation décrivant la variété d'objets que l'atelier sera en mesure de créer et de manipuler.

Fonctionnement du modèleur mathématique

Dans à IMA, les formes sont modélisées à partir de patches.

Patch :

Un patch est une surface créée à partir d'un réseau de courbes de Bézier selon deux directions distinctes appelées N_v et N_u . Selon chaque direction sont définis des polynômes (possédant donc un ordre et un nombre de pôles) contenant

directement la géométrie du patch. Ces polynômes sont descripteurs de la surface et la contrôlent. On appelle parfois ces patches des surfaces de subdivision. Deux exemples de modèles générés avec IMA sont illustrés en Figures 4.10 et 4.11.

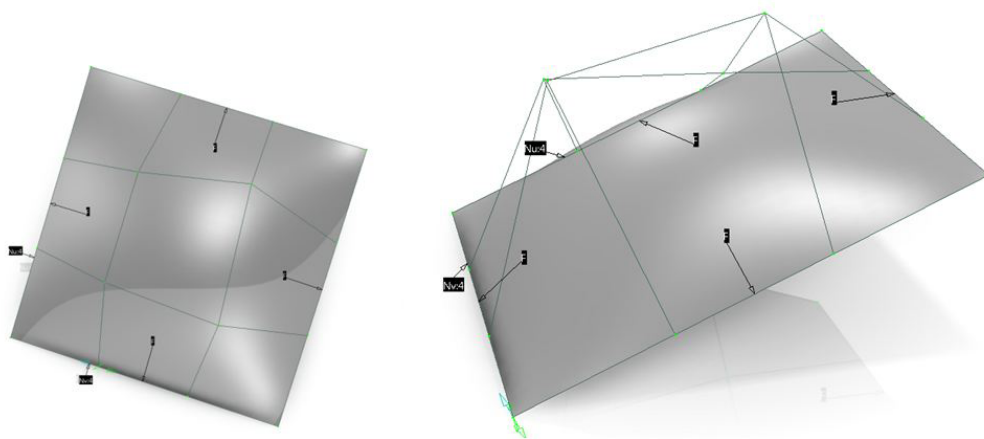


FIGURE 4.10 – Un patch avec ses polynômes de contrôle selon deux points de vue.

Lorsqu'un objet est créé dans IMA, celui-ci est introduit sous la forme d'un volume initial tel un cylindre, une sphère, un cube, un tétraèdre ou encore un tore. L'intégralité de ces entités basiques sont appelées des primitives. Il s'agit de surfaces fermées, ce qui signifie que l'objet est «creux» et ne possède pas d'épaisseur. Ces surfaces fermées sont subdivisées en un certain nombre de patches. Ces derniers sont reliés entre eux par des paramètres qui régissent leurs comportements afin de notamment garantir une surface continue de patch en patch. Selon le degré de complexité des objets et les cohérences tangentielles ainsi que de courbure entre les différents patches créés, les patches sont réalisés à partir de courbes de Bézier ou de «Non Uniform Rational Basis Splines» (NURBS) lorsque la surface comporte des singularités. Le point pour lequel trois patches se rencontrent est une singularité, la qualité de surface proposée localement est alors inférieure à celle des autres points de la surface. La Figure 4.12 illustre deux patches côte à côte avec leurs courbes de contrôle visibles.

Ainsi, les patches sont donc corrélés par des règles qui régissent leurs comportements et déformations, tout en respectant un standard de qualité de surface.

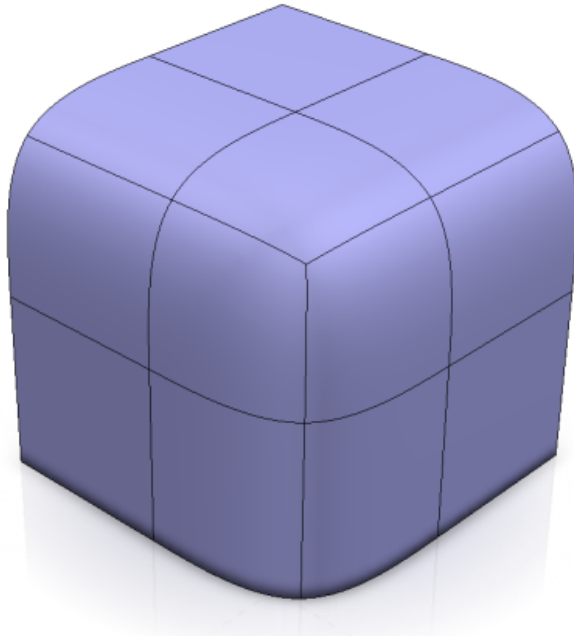


FIGURE 4.11 – Un objet dans IMA. Les patches sont visibles.

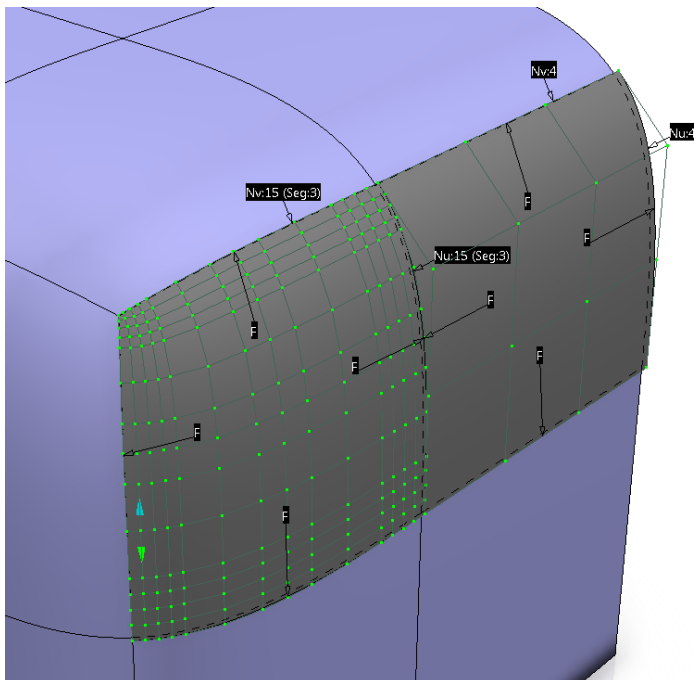


FIGURE 4.12 – Zoom sur deux patches adjacents et leurs propriétés.

Cette technique est unique dans un environnement CAO industriel. Les concepteurs sont ainsi capables de générer des modèles dont la qualité de surface est prédéterminée. Cette dernière est en effet un critère primordial en conception industrielle concernant à la fois des aspects techniques de fabrication, mais aussi des dimensions d'appréciation esthétiques.

La qualité de surface

La qualité perçue est un réel avantage concurrentiel. Avec l'esthétique formelle, un bel aspect de surface conditionne la première impression de qualité du client. La qualité de surface est particulièrement importante dans l'automobile, le plus haut standard industriel actuel accessible au grand public. Ce standard est utilisé dans l'industrie sous la dénomination «Classe A».

Abordons brièvement quelques détails techniques. Localement, une surface est définie par la fonction $z = f(x,y)$ et les pentes en un point donné M par dz/dx et dz/dy . La variation locale de la pente est caractérisée par les dérivées spatiales d^2z/dx^2 et d^2z/dy^2 (et par la torsion $d^2z/dxdy$ qui est ici négligée). Les dérivées spatiales des pentes correspondent aux courbures locales en x et y de ce point. L'information de pente locale est donc essentielle pour obtenir, par dérivation numérique, la cartographie de la surface en courbures locales. Un défaut d'aspect se caractérise alors par une variation d'altitude associée à une longueur d'onde.

Ces deux informations conditionnent la vitesse de variation de la pente locale, dérivée seconde de l'altitude, qui représente mathématiquement la courbure locale. L'information d'altitude seule est donc peu pertinente si une longueur d'onde ne lui est pas associée. Pour illustrer notre propos, un creux de $50\text{ }\mu\text{m}$ étendu sur 50 mm sera moins visible à l'œil qu'un creux de $20\text{ }\mu\text{m}$ étendu sur 20 mm du fait d'une courbure locale plus faible pour le premier défaut. Des solutions industrielles avancées génèrent généralement des modèles 3D dont la qualité de surface sera optimale. Il existe notamment des outils mathématiques et des éclairages de surface spécifiques qui soulignent les éventuels défauts.

Sur la Figure 4.14, se distinguent nettement les défauts de la surface par rapport à la Figure 4.13, ce qui illustre que la qualité de surface est une propriété essentielle des représentations. Des professionnels sont spécialement formés à concevoir des surfaces de qualité, jusqu'au plus haut standard.

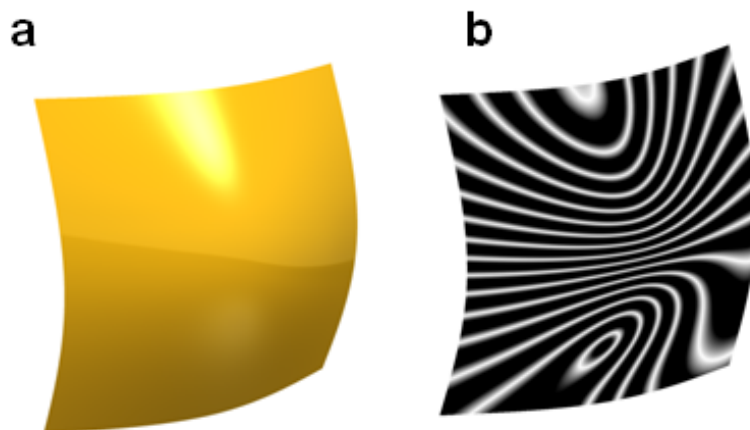


FIGURE 4.13 – Un patch présentant une qualité de surface satisfaisante. (a) Avec un matériau appliqué. (b) Avec un outil de visualisation des courbures.

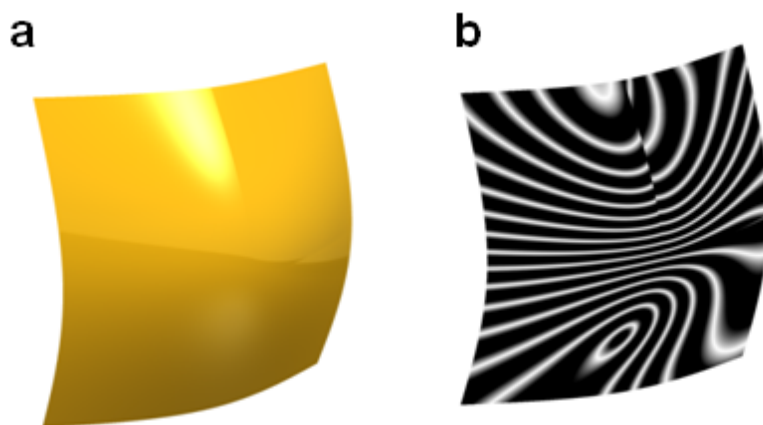


FIGURE 4.14 – Un patch présentant une qualité de surface médiocre. (a) Avec un matériau appliqué (b) Avec un outil de visualisation des courbures.



FIGURE 4.15 – Une automobile dont les flancs sont particulièrement travaillés. Des surfaces extrêmement complexes sont visibles.

La Figure 4.15 illustre une qualité de surface particulièrement travaillée. De son côté, l'atelier IMA propose au concepteur d'interagir avec des patches aux propriétés contraintes. Les surfaces composées de patches doivent obligatoirement se joindre en respectant un niveau de qualité industrielle garanti. Les designers industriels produisent alors des formes sans se soucier de leur compatibilité ultérieure avec le standard de qualité puisqu'elles sont d'ores et déjà de la qualité de surface souhaitée. Cette propriété unique dans l'industrie et brevetée est rendue possible par la puissance du modelleur géométrique de l'atelier et de la suite logicielle CATIA.

Import de primitives

IMA présente une caractéristique importante inspirée du «clay modeling». Une nouvelle conception débute généralement par l'import d'une forme standard de référence dont l'utilisateur choisit la résolution par défaut. Cette forme peut être un volume ou une surface comme l'illustre la Figure 4.16. Cette méthode dispense l'utilisateur d'outils complexes nécessitant de concevoir la forme initiale d'une page blanche.

Une fois la représentation sélectionnée, une forme géométrique est importée dans l'espace de travail. Les modèles sont des approximations qui maintiennent une apparence inachevée. Ce sentiment est renforcé par l'absence d'affichage de

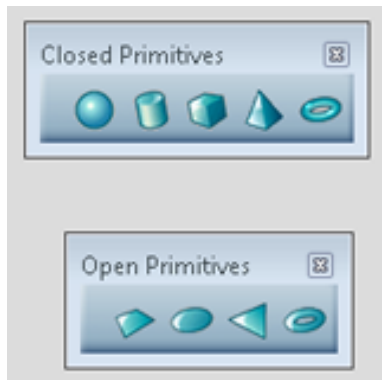


FIGURE 4.16 – Les objets directement importables au sein de l’espace de travail.

nombres ou de grandeurs physiques immédiatement visibles comme proposés pour les autres ateliers. Par défaut, les patches ne sont pas affichés, l’utilisateur a donc le sentiment de manipuler un volume consistant.

Modification des formes et surfaces *via* les manipulateurs

Afin de modifier et de transformer un objet, l’utilisateur a recours à des manipulateurs. Ces manipulateurs visibles sur la Figure 4.17 sont corrélés à des entités spécifiques de l’objet comme les points, lignes, faces ou encore l’objet dans son intégralité. La particularité de cet atelier est que la sélection d’outils n’est pas requise pour modifier l’objet. Il est ainsi possible d’interagir instantanément avec le résultat et donc en conséquence avec l’objet ainsi que sa forme.

L’originalité d’IMA, en tant qu’atelier d’une suite de CAO industrielle est que les outils ne sont pas principalement des fonctions réalisant des opérations de type «Features». Les outils proposés dans l’atelier réalisent directement des déplacements géométriques pilotés par les manipulateurs qui eux-mêmes dirigent la géométrie de l’objet. Ils permettent ainsi de déplacer selon une direction, d’appliquer une rotation ou encore de réaliser des mises à l’échelle, uniformes ou non uniformes. Il est également possible de changer la force d’influence de chaque manipulateur. L’utilisateur a ainsi un contrôle immédiat sur ce qu’il est en train de concevoir et peut intervenir en itération continues avec l’objet de sa conception, comme le fait le praticien réflexif de Schön ([92, 93]).

Modélisation de l’atelier

En s’appuyant sur les résultats déjà présentés précédemment, nous allons à présent modéliser l’atelier. Pour ce faire, nous utilisons la même notation que

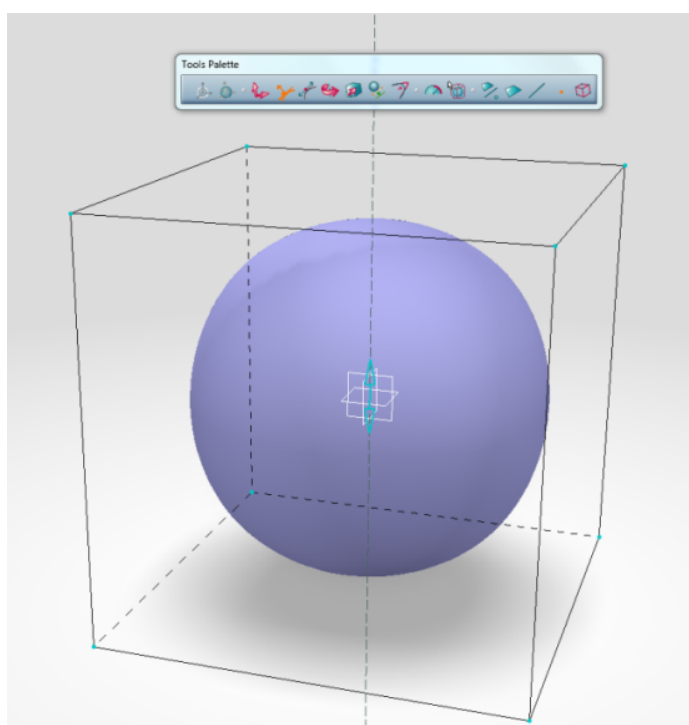


FIGURE 4.17 – Un objet IMA de type sphère en cours d'édition, avec sa boîte de manipulation et les différentes fonctions de manipulation.

celle développée précédemment pour l'atelier CATIA Part Assembly. Notre analyse d'IMA a mis en évidence l'importance des phases de perception et d'action lors desquelles le concepteur interagit avec le concept sous forme de représentation(s). La perception est la phase durant laquelle le concepteur assimile un stimulus qui lui fournit une représentation du modèle en cours de conception. Dans les outils de CAO, cette perception est essentiellement visuelle. L'action est la phase lors de laquelle le concepteur modifie la représentation du modèle ou la perception qu'il en a, un même modèle pouvant être perçu différemment selon les paramètres actifs du logiciel. Ces actions sont effectuées par l'intermédiaire d'outils ou bien directement sur l'objet comme c'est le cas dans IMA. L'impact de ces phases sur le modèle est illustré en Figure 4.18.

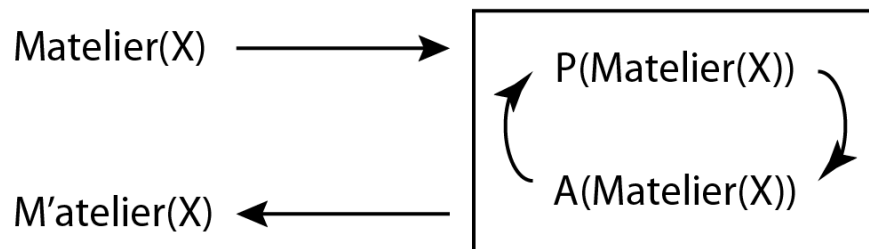


FIGURE 4.18 – Les phases de perception et d'action sur la représentation de l'atelier.

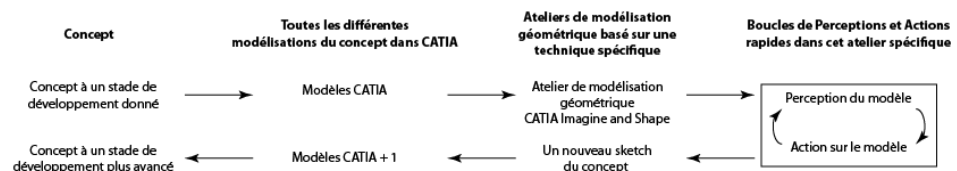


FIGURE 4.19 – La modélisation complète d'un atelier de conception numérique au sein d'une suite logicielle.

Lorsque la tâche dans l'atelier est achevée, le modèle est sauvé et capitalisé dans la base de données de la suite logicielle globale, ici CATIA comme l'indique la Figure 4.19. La forme simplifiée de l'atelier est représentée par la Figure 4.20.

4.1.4 Synthèse

En mobilisant un modèle détaillé, cette analyse fine de deux ateliers de conception numérique nous permet de rendre compte de leur grande richesse.

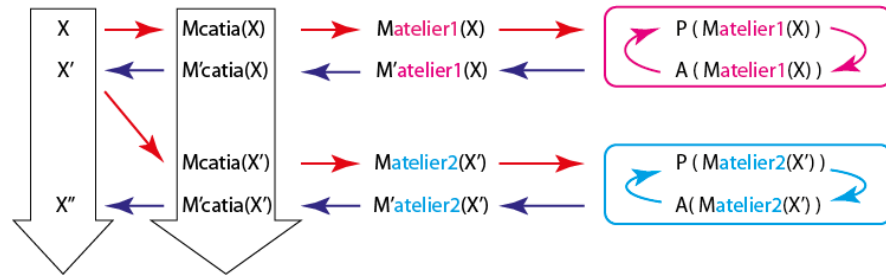


FIGURE 4.21 – Le modèle stratifié complet montrant les phases de conception lorsque plusieurs ateliers sont successivement mobilisés après une capitalisation au niveau du concept.

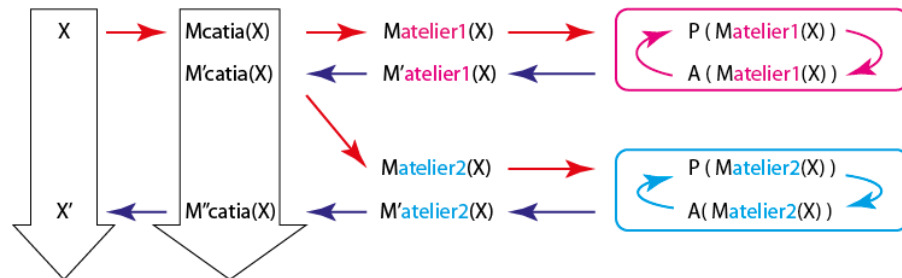


FIGURE 4.22 – Le modèle stratifié montrant les phases de conception lorsque plusieurs ateliers sont successivement mobilisés mais que les concepteurs ne sortent pas de la suite logicielle.

Un tel degré de finesse est nécessaire afin d'analyser les transformations à l'œuvre au niveau du concept, du modèle de la suite logicielle ou encore de l'atelier.

Les avantages du nouveau modèle

Ce nouveau modèle met en évidence plusieurs étapes cruciales jusqu'alors occultées lorsque des outils numériques de conception sont mobilisés. Les flèches indiquent l'ensemble des phases de modification, de transformation ou de conversion des représentations mais pas nécessairement du concept. Ainsi, les principaux points soulignés sont les suivants :

>L'évolution du concept dans la suite de conception est distincte de l'évolution du concept. La totalité de ses dimensions ne sont pas modélisées ou même modélisables. Analogiquement, les ateliers ne manipulent pas toujours des représentations parfaitement adaptées au niveau de représentation de la suite logicielle.

>Le résultat de l'utilisation d'un atelier n'est pas toujours réintégré dans le modèle général de la suite. De la même façon, lors de l'intégration et du passage de la représentation de la suite au concept, des dimensions peuvent disparaître.

>Les ateliers n'agissent que sur un sous-ensemble des représentations du concept présent dans le modèle du concept conservé par la suite logicielle. Les perceptions actions sur le modèle dépendent surtout de la représentation offerte par l'atelier et par la suite logicielle et non pas du concept. Les perceptions actions ainsi que tous les aspects de modélisation et d'intégration dépendent alors directement de la puissance de la suite logicielle.

>Nous pouvons étudier finement les impacts des phases de conception sur les multiples représentations du concept lui-même.

4.3 Validation du modèle stratifié

Nous allons à présent soumettre notre modèle stratifié à une caractérisation d'ateliers aux propriétés radicalement différentes de celles des ateliers numériques. Ces derniers nous fournissent en effet deux cadres de travail très distincts afin de valider notre modélisation inédite.

4.3.1 Atelier de sketching

Présentation et propriétés de l'atelier

Pour de nombreux chercheurs et praticiens, dessiner est une activité représentative de la profession de concepteur, et en particulier des designers industriels. Lorsque Buxton ([16]) se demande «quelle est l'activité archétype de la

conception ?». Il cite alors Jones ([58]) qui précise qu'il s'agit du dessin. Fällman ([34, 35]) répond en précisant qu'il s'agit du «sketching». Le «sketching» est différent du dessin dans le sens où les propriétés qu'ils mobilisent et exhibent sont différentes. Le sketch possède certaines caractéristiques qui le rendent unique : il est rapide à exécuter, mobilise peu de moyens, il est jetable sans regret, il présente un foisonnement de concepts, il requiert une technique spécifique d'exécution, il ajuste le niveau de détail en fonction de ce qu'il veut montrer, il est ambigu, il suggère et enfin il explore. Le terme pourrait être traduit par esquisser, ou réaliser un croquis en Français. De très nombreux chercheurs invitent également à considérer l'activité de «sketching» comme essentielle ([42, 40, 100]). La Figure 4.23 expose la différence entre un dessin et un sketch.

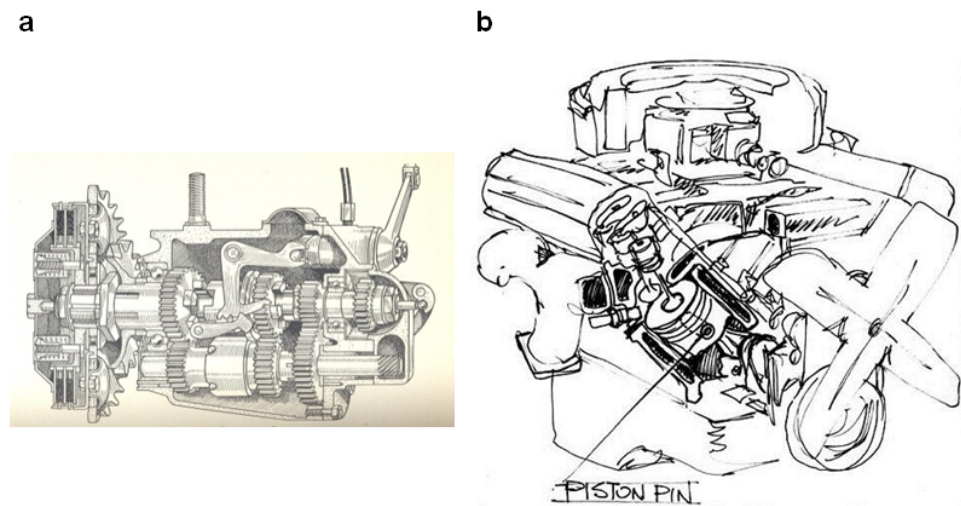


FIGURE 4.23 – Comparaison entre (a) un dessin (b) un sketch.

En «sketchant», un designer industriel utilise une compétence développée par la pratique et fondamentale de par ses modes de raisonnements. Schön ([92, 93]) signale ces deux caractéristiques dans ses deux livres et s'impose comme le précurseur de cette spécification de la réflexivité dans la conception. En effet, le sketch introduit une conversation et un raisonnement de conception unique. Cette technique est un moyen « low-cost » de générer de l'imagerie interactive par une production continue de croquis. Une telle méthode permet au designer industriel de disposer d'un support visuel pour décrire quelque chose qui n'existe pas encore et qui doit être progressivement composée et ce, pour constituer l'entité encore indéterminée qui va émerger ([45]). Les designers industriels

ne réalisent pas des sketches pour représenter des idées qui existent déjà de façon consolidée dans leur esprit. Le sketch est un moyen pour conceptualiser et externaliser leur pensée. Les découvertes impromptues permises par le sketch font partie intégrante de l'exercice ([101]). Cette reflexivité est illustrée par la Figure 4.24.

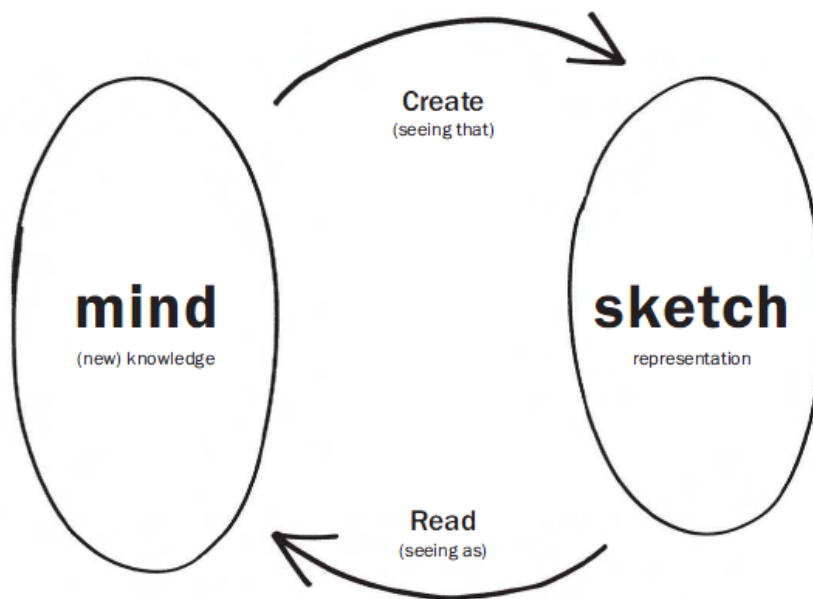


FIGURE 4.24 – Illustration du «dialogue» induit par le sketch ([16]).

Modélisation de l'atelier

Procédons à la modélisation de l'atelier de «sketching» comme accompli préalablement pour les ateliers numériques. Le concept existe indépendamment du sketch qui le représente. Celui-ci peut d'ailleurs exister sous la forme d'une grande quantité de représentations de nature très différente telles que des maquettes, des modèles numériques ou encore une collection de références («mood boards»). Nous illustrons le processus en le décomposant suivant la nature des représentations. En premier lieu, se trouve le Concept, somme de l'ensemble des représentations qui lui sont consacrées et à partir desquelles on peut déduire des propriétés courantes et ciblées. En second lieu se trouvent toutes ses représentations. Ensuite nous retrouvons les ateliers de modélisation de type «sketching». Enfin, au sein de l'atelier se déroulent des séquences de perception

et d'action sur une représentation en particulier. La forme modélisée de l'atelier est introduite par la Figure 4.25.

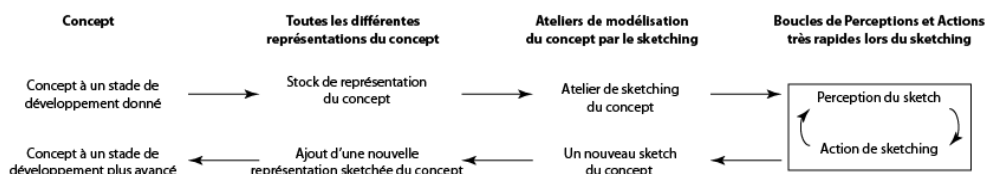


FIGURE 4.25 – Modélisation de l'atelier de sketching dans le processus de conception.

Une telle modélisation de l'atelier de «sketching» montre des similitudes avec les résultats obtenus pour les ateliers numériques :

- >Le sketch n'est pas nécessairement l'unique représentation du concept.
- >Un sketch ne modifiera pas le concept si sa représentation n'est pas intégrée.
- >Lors de l'utilisation aux propriétés distinctes, telles que «sketching» et atelier numérique de conception, les étapes de modélisation et de capitalisation sont au moins aussi cruciales que celles de manipulation (perception et action) des représentations. Ceci justifie la complexité rencontrée quant à la résolution de le «design gap».

4.3.2 Atelier de formation à la créativité du Bauhaus

Présentation l'atelier

Le Bauhaus est un institut des arts et des métiers qui fût fondé en 1919 à Weimar (Allemagne) sous le nom de «*Staatliches Bauhaus*» par Walter Gropius. Il sera fermé en 1933 par les Nazis après avoir déménagé plusieurs fois sous la pression politique. Le Bauhaus est généralement considéré comme la première école de design industriel et ses théories du Bauhaus ont toujours inspiré les formations des designers industriels ([32]). A ce titre, le Bauhaus n'apparaît pas seulement comme un héritier direct de la conception en ingénierie. Les premières étapes, de ce qui sera plus tard appelé design industriel, introduisent des problèmes et objectifs qui étaient davantage négligés lors d'études purement techniques. Ceci comprend notamment la simplification des usages, des valeurs émotionnelles, sémantiques et symboliques. Cependant, ces distinctions ne doivent pas masquer le fait que le Bauhaus repose sur de forts principes théoriques ([69]). Nous allons dans cette partie nous intéresser à un atelier spécifique du Bauhaus. Cet atelier était un cours enseigné par Johannes Itten, un des professeurs les plus emblématiques du Bauhaus. Johannes Itten est considéré

comme le premier à avoir représenté le cercle chromatique des couleurs sous sa forme actuelle, représenté en Figure 4.26.



FIGURE 4.26 – Le cercle chromatique des couleurs par Johannes Itten ([54]).

Ce cours de créativité était proposé parmi les «Basic course» du Bauhaus, à savoir un ensemble de cours d'éveil à l'art et au processus créatif. De notre point de vue, il s'agit d'un témoignage intéressant et unique des méthodes d'apprentissage ainsi que de défixation enseignées dans le but de développer des compétences en créativité et innovation. Du fait de son caractère très spécifique et original, ce cours-atelier est un cadre idéal d'étude pour confronter notre nouveau modèle notamment en matière de flexibilité. Les domaines abordés sont nombreux comme l'illustre la Figure 4.27.

Trois objectifs majeurs sont ciblés lors de ces «Basic course».

- >Libérer les forces créatives et le talent artistique des étudiants.

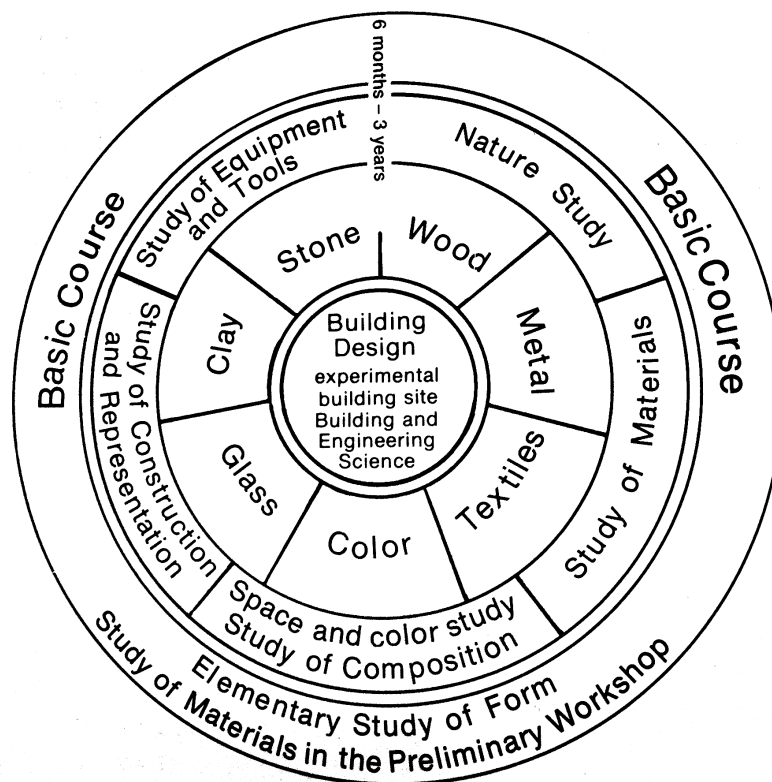


FIGURE 4.27 – Les «Basic course» enseignés au Bauhaus.

> Orienter la carrière artistique des étudiants vers le domaine où ils sont les plus doués, ce qui sous-entend préalablement leur domaine d'excellence.

> Présenter les principes de la composition artistique.

A l'issue de ce semestre de formation, chaque étudiant doit «trouver sa voie», c'est-à-dire le domaine dans lequel il possède une aisance naturelle d'expression, Itten explique comment selon lui chaque individu possède certains traits de caractère et des talents innés selon une ou plusieurs orientations : «contraste clair-obscur», «rythme», «métal» ou encore «bois». Pour illustrer notre propos, nous analysons une série d'exercices proposés par Johannes Itten dans son cours d'apprentissage des textures. Afin de pouvoir identifier les différentes phases à notre modèle nous les numérotions.

L'organisation de l'atelier

Lors d'une première phase (P1) il est demandé aux étudiants de dessiner un citron. En commençant par la représentation d'un objet Itten souhaite que les étudiants, fixés par un «problème de géométrie de la forme», se posent la question de «quelle est l'essence du citron dans le dessin» (P1'). Il s'agit bien d'un exercice de défixation, destiné à encourager les étudiants à ne se concentrer que sur les dimensions géométriques des objets. En prenant conscience de leurs propres limites, les étudiants sont invités au cours de cet exercice à dépasser la fixation.

Au cours d'un second temps les étudiants touchent diverses textures afin de «développer leur sens du toucher» (P2). Il s'agit d'une phase d'apprentissage lors de laquelle les étudiants aiguisent leur «sens de l'observation et améliorer leur perception». Ils deviennent ainsi capables d'associer la perception à un travail multi-sensoriel et non uniquement visuel.

Lors d'une troisième phase (P3) les étudiants doivent construire des «montages de textures dans des matériaux contrastés». Durant cet exercice, les étudiants utilisent ces textures comme des ressources de conception. La contrainte, c'est-à-dire concevoir en utilisant exclusivement des contrastes de textures, les astreint à développer de nouvelles connaissances à propos des textures (être capable par exemple de les distinguer, leur composition etc..) et à explorer l'espace du contraste entre textures. Les étudiants sont également en mesure d'explorer la capacité intrinsèque des textures en termes de générativité. Ceci signifie que la superposition de textures permet de créer des structures à l'identité nouvelle, comme un concept au sens de la théorie CK ([47, 49]). Par exemple, peuvent être distingués «rugueux lissé», «fibre gazeuse», «transparent opaque» ou encore «morne brillant». La Figure 4.28 est ainsi un excellent exemple.

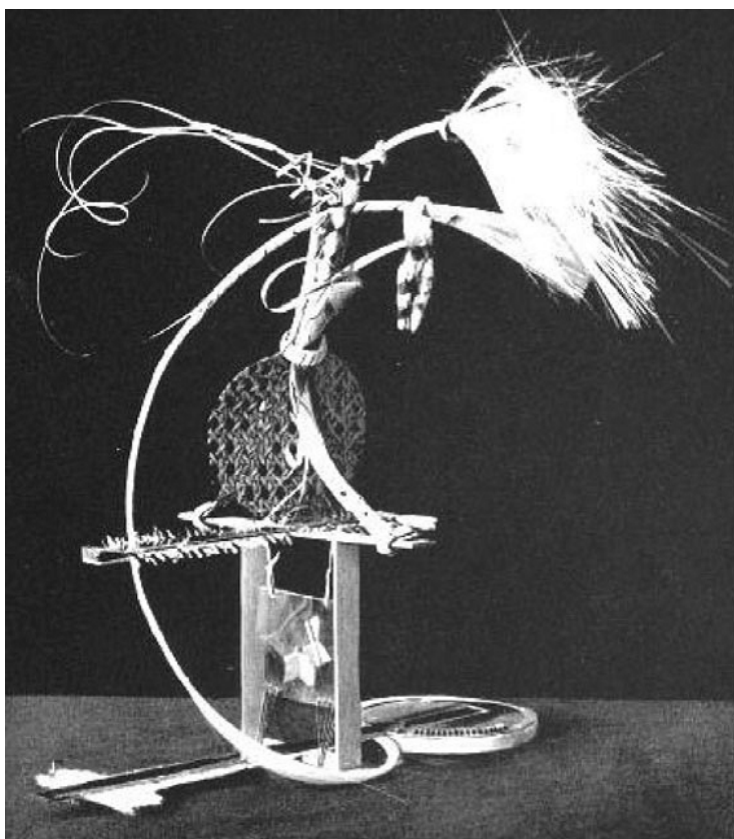


FIGURE 4.28 – Montage de textures tridimensionnel. M. Bronstein, Weimar, 1921 ([54]).

La quatrième phase (P4) peut être qualifiée de recherche. Les étudiants, déjà sensibilisés à la variété des attributs d'une texture, sont sommés de «sortir» pour «trouver des textures rares dans les plantes». Il est intéressant de souligner qu'Itten ne débute pas ses cours par une telle phase et qu'il est conscient que ses étudiants doivent d'abord exercer leur capacité à identifier du nouveau, de l'inattendu avant de générer leur propre librairie de textures. Les étudiants explorent en particulier la totalité des textures composant un matériau donné. La Figure 4.29 illustre un exercice de recherche de juxtapositions de textures sur le bois.

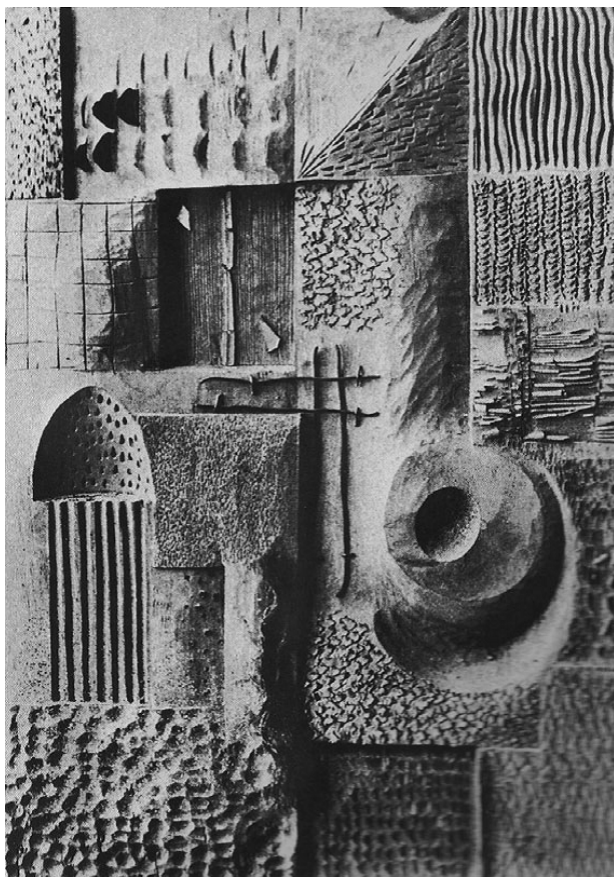


FIGURE 4.29 – Juxtaposition de textures réalisées dans du bois ([54]).

La cinquième phase (P5) consiste en la représentation de textures. Itten stipule que les étudiants doivent «représenter d'après leur sensation personnelle», «par cœur», et de passer de «l'imitation» à «l'interprétation». La Figure 4.30 montre le degré de réalisme que les étudiants sont capables d'atteindre unique-

ment en faisant appel à leur mémoire. C'est un révélateur de leur maîtrise des textures récemment acquise.

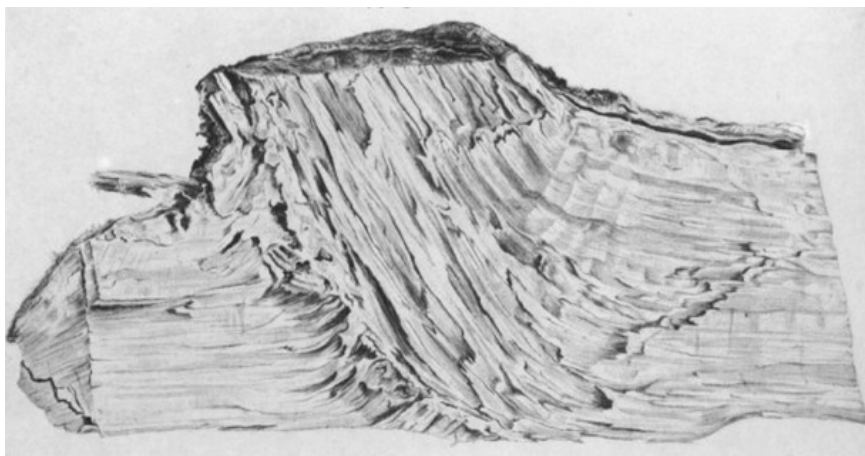


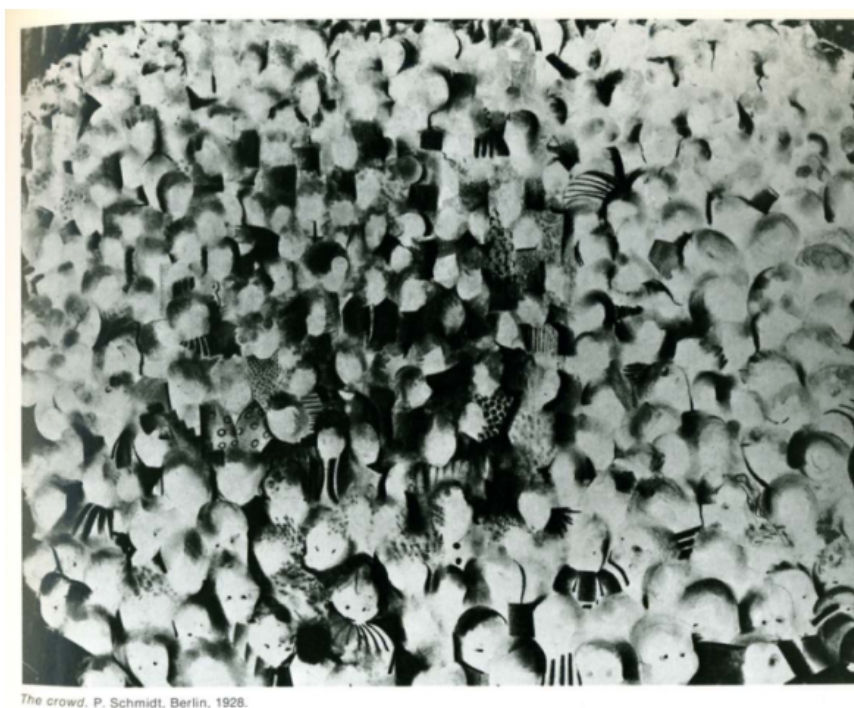
FIGURE 4.30 – Un morceau de bois dessiné de mémoire. L. Leudesdorff-Engstfeld, Weimar, 1922 ([54]).

La sixième et dernière phase (P6) consiste en la caractérisation de phénomènes environnementaux sous forme de textures. La Figure 4.31 illustre parfaitement cette nouvelle compétence. Ce que nous percevons change selon qu'on observe l'œuvre dans sa globalité où en s'intéressant aux détails.

Le professeur Itten incite les étudiants à utiliser les textures comme un moyen d'expression autonome et non simplement comme une «contrainte» ornementale. En combinant leur algèbre enrichi de textures, ils peuvent créer de nouvelles «scènes texturées» qui sont plus que des scènes et plus que des textures. Comme expliqué par Johannes Itten, ce type d'atelier «stimule» les étudiants et leur apprend à se détacher des stéréotypes et à produire de relations formelles inédites. Il s'agit donc à la fois d'une théorie descriptive des textures et d'une méthode pour créer ainsi que générer de nouvelles textures et pour améliorer la capacité de chacun à les utiliser comme ressource générative. Ce type d'ateliers pourrait tout à fait trouver sa place dans les suites numériques de conception pour défixer à des moments cruciaux les concepteurs et ainsi les rendre plus créatifs.

Le point de vue du modèle

Le modèle rend bien compte du processus de conception de type «formation» qui s'établit au cours de cet atelier. Ici le concept développé est la progression



The crowd. P. Schmidt, Berlin, 1928.

FIGURE 4.31 – Une foule représentée sous la forme d’une texture. P. Schmidt, Berlin, 1928 ([54]).

graduelle de l'étudiant à maîtriser de manière créative un domaine. Atelier après atelier, l'étudiant augmente ses connaissances, les applique et enfin est capable d'en générer des inédites. En cette succession de phases, nous pouvons cartographier les étapes sur le nouveau modèle du processus. A chaque étape, une capitalisation des connaissances est assimilée par l'étudiant ainsi qu'une augmentation de ses capacités créatives. Nous illustrons le processus en le décomposant suivant la nature des représentations.

En premier lieu, se trouvent les capacités créatives de l'étudiant qui correspondent à ses connaissances et les liens qu'il est capable d'effectuer entre elles pour faire surgir de la nouveauté. En second lieu, la thématique d'apprentissage des textures est conduite. Puis, nous retrouvons les ateliers de modélisation ou de découvertes relatifs aux textures. Enfin, au sein des différents ateliers se déroulent des séquences de perception et d'action sur une représentation spécifique.

La Figure 4.32 illustre le processus stratifié de l'exercice du Bauhaus. Chaque couleur utilisée identifie une phase spécifique et associe les connaissances apprises ou travaillées.

4.3.3 Synthèse

Le modèle des suites numériques que nous avons proposé est bien adapté pour décrire des ateliers de conception aux propriétés extrêmement variées. Se distingue d'ailleurs au sein de cette modélisation une représentation qui fait écho aux propositions de Bouchard et al. ([9]) ou encore de Hatchuel et al. ([48]). Représenter le processus selon deux axes et non pas un seul, comme usuellement employé au sein de processus séquentiels, fait apparaître des caractéristiques intéressantes.

De plus, notre modèle permet d'identifier certaines des hypothèses implicites et restrictives du modèle séquentiel dans le cas des outils numériques de conception. Les différentes phases de modélisation et de capitalisation restituées *via* ce modèle original livrent des détails rendant possibles la proposition d'hypothèses alternatives. En effet, le processus d'accumulation est révélé sous la forme de la stratification successive des capitalisations. Enfin, la transformation des représentations au sein des ateliers lors des phases de perception et d'action est soulignée.



FIGURE 4.32 – Modélisation stratifiée de l'atelier d'apprentissage des textures de Johannes Itten.

4.4 Proposition d'hypothèses alternatives

4.4.1 Première hypothèse alternative

Reconsidérons à présent la première hypothèse. Le modèle séquentiel est de type «Trade-Off», c'est-à-dire qu'il impose, lors de son déroulement, un échange entre la générativité du concept et sa robustesse. Ce constat est confirmé par les chercheurs qui étudient les outils de conception. Les outils proposés en début de processus, tels le «sketching», sont capables d'offrir beaucoup de générativité au détriment de la robustesse. Au contraire, les outils de CAO utilisés plus tardivement durant les phases de développement ont tendance à diminuer la générativité pour augmenter la robustesse de la conception. Nous souhaitons montrer que ce trade-off n'est pas une fatalité. En découvrant un atelier capable de proposer un gain simultané en générativité et robustesse, il devient possible d'élaborer des processus qui réalisent également ce type de performance. Le processus de conception et d'accumulation dans la suite de conception est visible sous la forme d'une flèche verte dans la Figure 4.33. L'impact d'un atelier est symbolisé par un cadre de la couleur de l'atelier. Précisons que l'atelier influe non seulement sur la modification de la représentation mais aussi et surtout sur la capacité de capitalisation offerte par la suite logicielle CATIA.

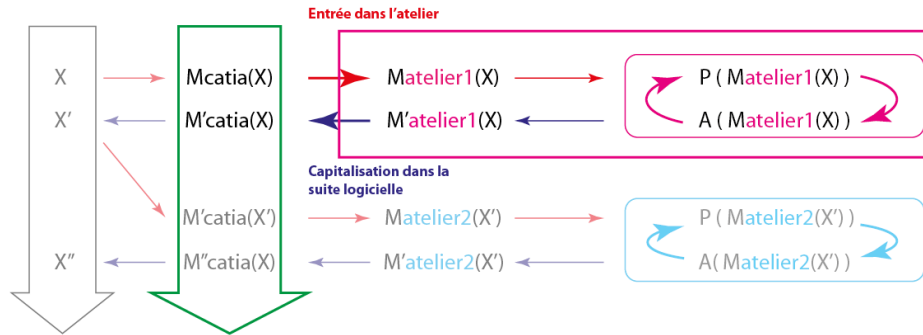


FIGURE 4.33 – Le modèle stratifié montre l'influence des ateliers sur le processus général de conception.

Nous émettons alors l'hypothèse suivante : certains ateliers numériques de conception possédant des propriétés spécifiques sont en mesure de fournir un gain simultané de robustesse et générativité de la conception. Par rapport au modèle présenté en Figure 4.33, ceci se traduit par une évolution positive simultanée en robustesse et générativité entre l'entrée dans l'atelier (flèche rouge épaisse) et sa sortie réintégrée dans la suite logicielle (flèche bleue épaisse).

4.4.2 Seconde hypothèse alternative

Reconsidérons grâce au modèle stratifié la seconde hypothèse du modèle séquentiel qui suppose que les avatars résultent de couches successives de conception assimilable à un raffinement progressif de l'objet. Les avatars, qui correspondent aux différentes représentations manipulables dans les ateliers et accumulés au niveau de la suite logicielle, apparaissent comme étant différentes descriptions du concept et non pas une représentation unique qui serait successivement épurée.

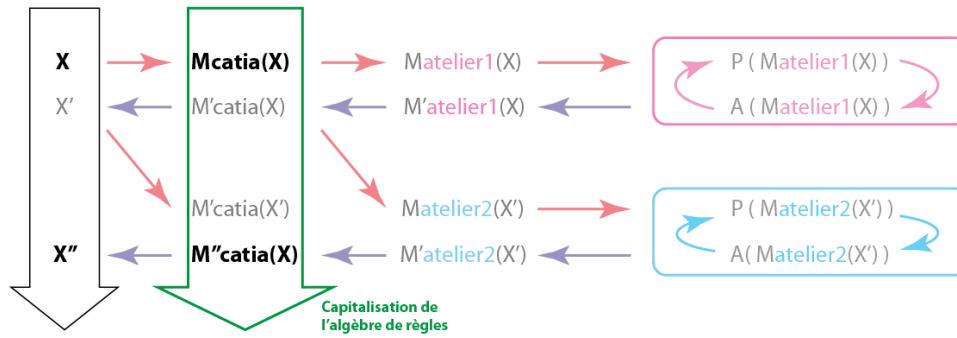


FIGURE 4.34 – Le modèle stratifié montre que l'évolution du concept ainsi que sa modélisation au sein de la suite logicielle ne sont pas le résultat d'un raffinement successif.

Nous énonçons alors l'assertion suivante : les avatars ne sont pas le résultat de couches successives qui proviendraient d'un simple raffinement progressif de l'objet, ils sont l'instanciation à un moment précis d'un algèbre de règles qui est généré au cours de la conception. Cet algèbre de règles est produit au sein des ateliers et capitalisé au niveau de la suite logicielle (flèche verte épaisse de la Figure 4.34).

4.4.3 Troisième hypothèse alternative

Nous employons à nouveau notre modèle pour analyser précisément la logique d'accumulation mobilisée dans la suite logicielle. Il s'agit de comprendre comment la base de règles est constituée. Le modèle séquentiel considère qu'un processus de sélection et d'élimination se produit. Nous analysons ainsi comment, au sein d'un atelier, les concepteurs effectuent des séquences d'action perception mais aussi dans quel but ainsi que comment leurs actions sontinstanciées d'abord dans la représentation de l'atelier et enfin comment l'accumulation est permise par la structure de données au niveau du modelleur géométrique de la suite géométrique. Ce niveau d'analyse est illustré par la Figure 4.35 ci-dessous.

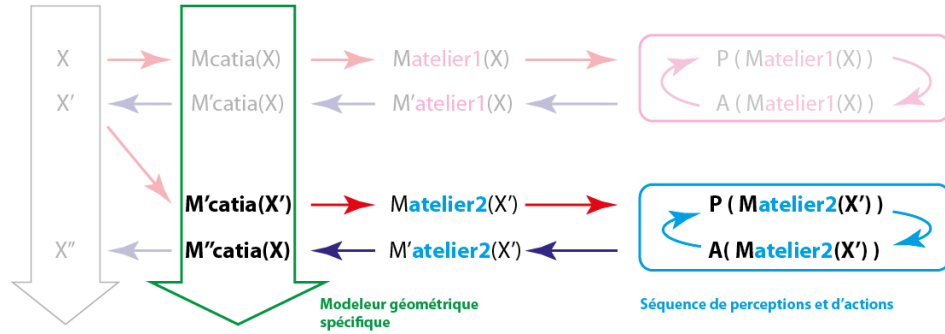


FIGURE 4.35 – Le modèle stratifié souligne l'importance du processus d'accumulation permis par les spécificités du modèle géométrique de la suite logicielle et des capacités d'interaction au sein de l'atelier.

Nous conjecturons alors que la logique d'accumulation est une logique d'enrichissement de la base de règles permettant d'instancier des familles de produits. Elle rend possible une méthode dans laquelle des paramètres ne sont pas forcément successivement instanciés. La logique très différente entre les suites de conception pour les artistes 3D et les ingénieurs s'explique par des algèbres à la nature profondément distinctes. Les interfaces de ces outils numériques ont été envisagées spécifiquement pour répondre à une logique d'accumulation propre. Les designers industriels possèdent leur propre raisonnement de constitution de la base de règle qui est davantage qu'un hybride des outils pour les ingénieurs et des artistes 3D.

Synthèse

Le modèle stratifié que nous avons proposé analyse le processus de conception numériquement outillé en changeant de perspective. Nous pouvons nous libérer de la fixation du modèle séquentiel qui a conduit les outils numériques à répondre à des phases identifiées de conception visant progressivement à diminuer les parts indéterminées du produit en cours de développement. La possibilité d'améliorer simultanément robustesse et générativité d'un concept, le changement de nature de celui-ci en un algèbre de règles ainsi que la révision du processus d'accumulation dans la suite numérique instaurent des nouveaux modèles pour l'intégration des méthodes des designers industriels créatifs. Nous allons ainsi dans la suite de notre travail développer des méthodes afin d'expérimenter les trois hypothèses alternatives que nous avons préalablement proposées grâce à notre modèle original. Chaque démonstration nécessitera une méthode adaptée qui sera présentée sous la forme d'un article.

4.5 Résultats industriels

Le nouveau modèle stratifié des raisonnements de conception outillés numériquement que nous proposons ouvre la voie à des résultats académiques prometteurs. Sa mobilisation directe permet également de proposer une architecture logicielle en cohérence avec des points identifiés comme majeurs représentés sur la Figure 4.36.

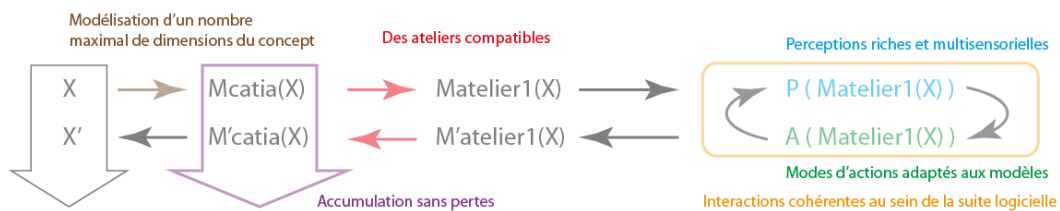


FIGURE 4.36 – Le modèle stratifié identifie les étapes critiques du processus.

Ce nouveau modèle stratifié nous apporte ainsi :

- >Une modélisation d'un nombre maximal de dimensions du concept. La suite logicielle est en mesure de modéliser des propriétés variées du concept telles que sa symbolique, sa texture, son odeur ou encore la chaleur que ce dernier dégage.
- >Une accumulation des connaissances et données qui correspondent à l'algèbre de règles. Un tel assemblage est accompli nécessairement sans pertes. Toute modification ou itération est obligatoirement capitalisée dans le système.
- >Des ateliers qui sont forcément capables de proposer des représentations adaptées aux dimensions du concept lesquelles seront traitées et capitalisées dans la suite logicielle, et ce, sans perte.
- >Des outils ainsi que des interactions cohérentes transversalement à la suite. Un socle de fonctionnement est partagé entre les ateliers même différents, notamment pour adresser les besoins de base en environnement virtuel : recherche, sélection et navigation.
- >Des perceptions au sein de l'atelier qui sollicitent les sens de manière variée et adaptée sans se concentrer exclusivement sur la vision (contrairement à ce qui est proposé actuellement).
- >Des actions dans l'atelier qui balaient une large palette d'interactions homme/machine et ce, en adéquation avec les modèles.

Afin de répondre à ces impératifs, il nous faut considérer simultanément les quatre disciplines académiques précédemment évoquées, à savoir les sciences informatiques, cognitives, de gestion et les théories de la conception qui suggèrent pour chaque problématique des solutions dédiées et spécifiques.

4.5.1 Une plateforme générique

Nous proposons alors une plateforme capable d'accueillir une grande variété d'outils de conception compatibles avec les designers actuels et les designers créatifs à méthode. Cette plateforme est générique et intègre également la plus plupart des interfaces actuelles de conception actuelles, telles que le couple clavier-souris, les tablettes graphiques ainsi que multitouch, et les interfaces immersives, des plus simples aux plus complexes (type CAVE). Nous avons défini précisément certaines actions génériques telles que recherche, sélection et navigation.

Nous avons ainsi suggéré plusieurs concepts issus d'un benchmarking entre la suite logicielle CATIA, des outils de CAO concurrents ainsi que des jeux vidéo dans lesquels de telles actions génériques sont courantes. Parmi cette palette de propositions et sur la base des recommandations académiques, nous forgeons nos propositions. La Figure 4.37 est ainsi un exemple des différentes propositions utilisées dans les jeux vidéo pour le déplacement.

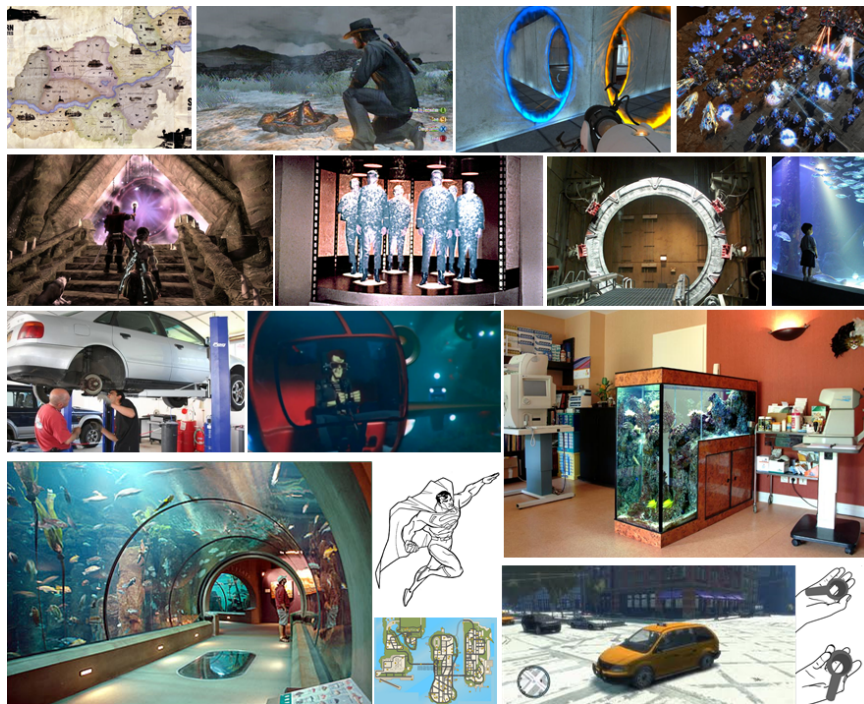


FIGURE 4.37 – Illustration de différentes solutions pour la navigation en fonction de la taille de l'objet avec lequel l'utilisateur interagit.

4.5.2 Trois brevets en cours de dépôt

Trois brevets sont actuellement publiés ou en cours de publication à l'office européen des brevets. Leur statut correspond à un «patent pending» à l'heure où cette thèse est écrite.

Brevet 1 : Method and system for designing a modeled assembly of at least one object in a computer-aided design system

Inventeurs : Hubert MASSON and Pierre-Antoine ARRIGHI.

DS2011-30 / Scale indicator in a designing space. "Patent pending" en Europe (EPO), Etats-Unis, Canada, Japon, République de Corée et Chine. Numéro du brevet : EP2590062 (A1).

Ce premier brevet offre aux utilisateurs d'outils CAO un moyen simple et rapide de prendre connaissance de l'échelle à laquelle ils sont en train de travailler. Cette capacité permet de mieux appréhender la représentation qui est manipulée, qui est souvent un problème en environnement virtuel. Le système fonctionne en affichant une icône qui correspond à l'échelle de travail courante. Le nombre d'icônes est volontairement réduit afin de favoriser la lisibilité. Un cas d'usage est illustré en Figure 4.38.

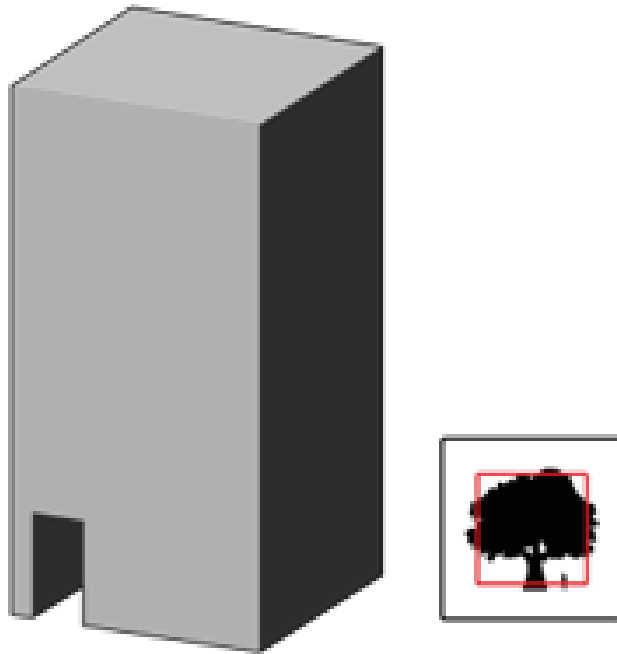


FIGURE 4.38 – Indication de l'échelle de travail par un système d'affichage continu d'icônes.

Brevet 2 : Method for instantiating an object and then performing a design operation with it

Inventeur : Pierre-Antoine ARRIGHI.

DS2012-10 / Designer Space. «Patent pending» en Europe (EPO) et aux Etats-Unis. *En attente de publication.*

Ce second brevet est une séquence d'actions simple et ergonomique. Avec celle-ci un ou des utilisateurs d'outils de CAO en environnement immersif sont capables d'accomplir une multi-sélection ainsi qu'une duplication de contenu. Cet enchaînement de gestuelles spécifiques réalise une métaphore du clavier afin de favoriser son apprentissage et son exploration. Ainsi, il devient possible de procéder à des multi-sélections et à des duplications sans outil mais aussi de manipuler de tels ensembles directement. Cette fonction est intéressante pour la plupart des ateliers, mais sera particulièrement adaptée aux cas de composition de contenu. La Figure 4.39 représente une des nombreuses vignettes d'un story board qui illustre la logique de fonctionnement dans le cas d'une multi-sélection.

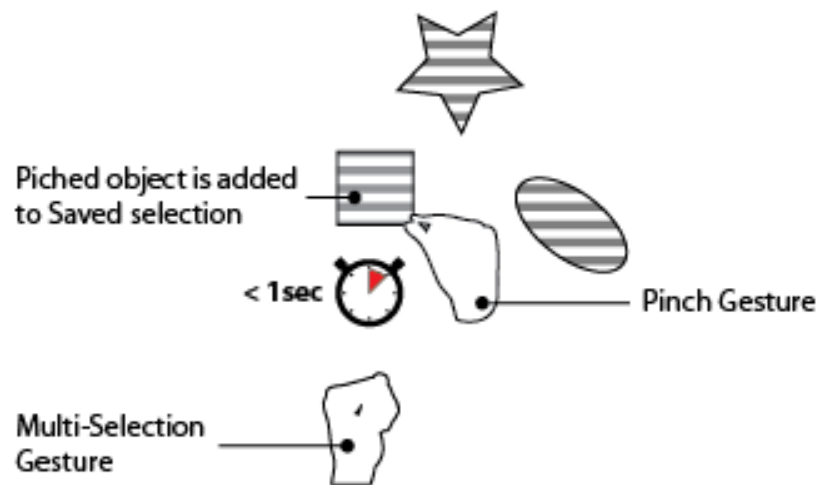


FIGURE 4.39 – Une illustration d'une combinaison gestuelle réalisant une multi-sélection en milieu immersif.

Brevet 3 : Method of calling a multi-selection, upon detection of a first body configuration of the physical designer.

Inventeur : Pierre-Antoine ARRIGHI.

DS2012-14 / Multi-sélection gesture. «Patent pending» en Europe (EPO). En attente de publication.

Ce troisième brevet permet à un utilisateur de sauvegarder du contenu dans une zone localisée par rapport à son corps. Cette invention fournit à l'utilisateur un accès simplifié à certains contenus fréquemment utilisés sans recourir à des imports compliqués. Le positionnement du Designer Space est illustré dans la Figure 4.40 sous la forme d'un exemple.

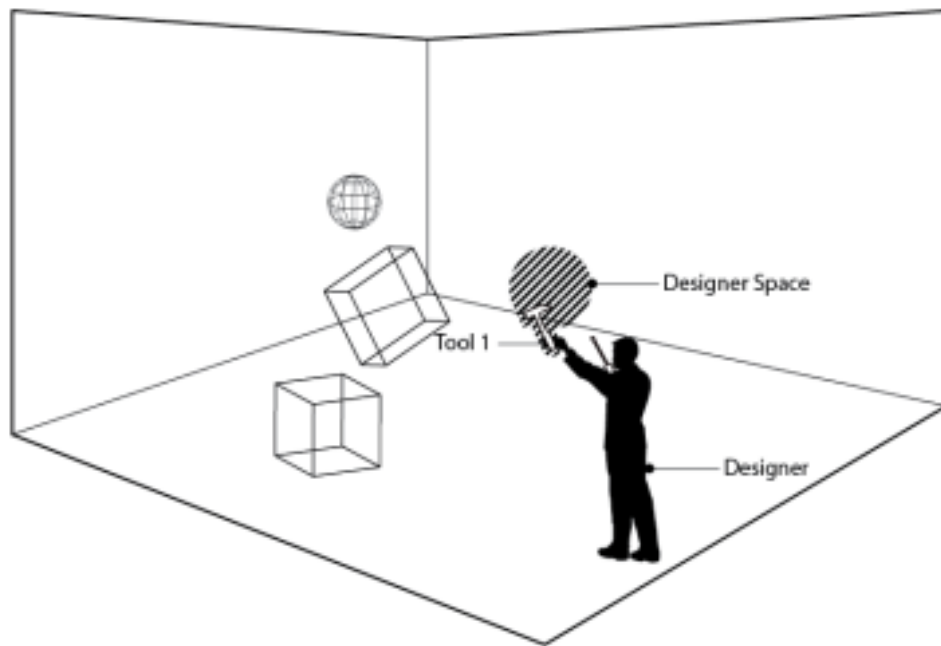


FIGURE 4.40 – Un designer et le «designer space» qui lui est associé dans un environnement de conception immersif.

Troisième partie

Des ateliers de conception aux capacités renouvelées grâce à l'originalité acquise

Chapitre 1

Contexte de l'article «Solving the dilemma between robustness and generativeness : the use of new design software at the design gap» par rapport à notre travail de thèse

Le modèle stratifié que nous proposons met en évidence le rôle prédominant des ateliers au sein du processus numérique de conception ainsi que leur corrélation avec la suite logicielle. Il s'agit d'une approche «mésoscopique» du processus comme illustré en Figure 1.1. Nous nous intéressons en effet aux raisonnements de conception lors d'une étape particulière d'interaction avec une représentation de l'objet et aux impacts qu'ils produisent.

Plus exactement, le modèle stratifié reformule la problématique du Trade-Off dans les ateliers. Notre modèle stratifié implique notamment une relecture de la première hypothèse du modèle séquentiel que nous rappelons ici :

Hypothèse 1 : Les ateliers de conception réalisent forcément un Trade-Off entre robustesse et générativité de la conception. C'est uniquement en abandonnant des degrés de liberté et d'originalité (générativité de la conception) que les concepteurs sont capables de converger, de réduire les incertitudes et d'augmenter la connaissance du produit, c'est-à-dire la robustesse de la conception. Nous

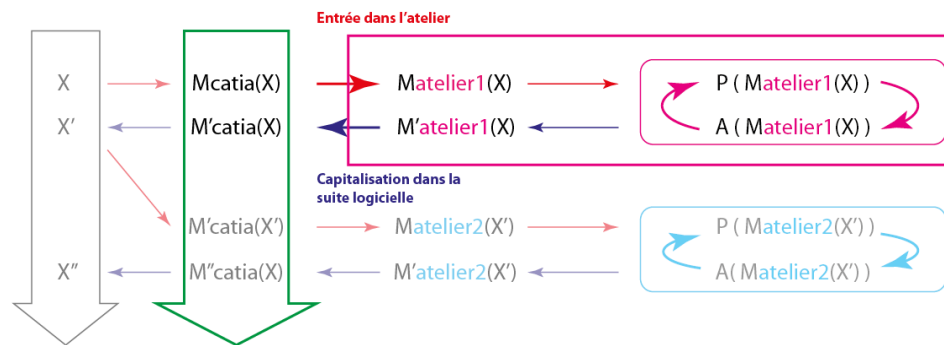


FIGURE 1.1 – Le modèle stratifié met en évidence l'influence des ateliers sur le processus général de conception. Approche « mésoscopique ».

formulons alors l'hypothèse suivante :

Hypothèse 1' : Certains ateliers numériques de conception possédant des propriétés bien spécifiques sont en mesure d'offrir un gain simultané de robustesse et générativité de la conception. Le modèle présenté en Figure X induit l'existence d'une évolution positive simultanée en robustesse et générativité entre l'entrée au sein de l'atelier (flèche rouge épaisse) et ce qui en sort et réintégré dans la suite logicielle (flèche bleue épaisse).

Chapitre 2

Résumé de l'article «Solving the dilemma between robustness and generativeness : the use of new design software at the design gap»

2.1 Problématique et enjeux

Des recherches ont montré que les outils numériques de conception ont tendance à dégrader la créativité de leurs utilisateurs et, par là même, l'originalité des concepts produits. A contrario, de tels outils accroissent la faisabilité des concepts en contraignant leurs utilisateurs à détailler les dimensions du produit en cours de conception. Lorsque les designers industriels tentent de s'extraire de cette problématique en utilisant des outils adaptés aux explorations conceptuelles mais non intégrés, ils rencontrent un problème majeur, le «design gap».

Le «design gap» est la phase de conversion des données, lorsque le média dans lequel le concept est initialement exprimé est susceptible d'être transcrit et intégré aux données de la suite de conception industrielle numérique. Astreints à choisir entre intégration et créativité, les designers industriels ne disposent alors pas d'outil satisfaisant, constat régulièrement identifié dans la littérature académique. Or, cette dernière n'identifie que des ateliers aboutissant à un Trade-Off entre générativité et robustesse et suggère essentiellement des outils adaptés à la créativité mais peu intégrés.

Ainsi, existe-t-il d'ores et déjà des ateliers possédant cette capacité de propo-

ser simultanément une augmentation simultanée de la robustesse et générativité des concepts ? Quelles sont leurs propriétés ? Certains ateliers de conception aux propriétés spécifiques peuvent offrir un gain simultané de la robustesse et générativité de la conception. Nous allons donc analyser, par l’intermédiaire notre modèle stratifié, un nouvel atelier qui prétend être en mesure de fournir un gain simultané de robustesse et générativité de la conception.

2.2 Méthodologie implémentée

Nous établissons un protocole expérimental à l’instant le plus stressant pour la conception des créatifs, i.e. le «design gap». Les concepts produits sous forme de représentations dessinées souvent imprécises sont alors numérisés dans des logiciels de modélisation 3D dits CAO. Le «design gap» entraîne généralement une évolution des concepts et a tendance à sacrifier leur originalité pour qu’ils puissent gagner en faisabilité selon la littérature. Ainsi, au sein de notre protocole, les designers industriels sont invités à suggérer des concepts sous la forme de sketches, qui sont ensuite numérisés par deux outils de CAO distincts. Les résultats de l’évolution des propriétés formelles des concepts sont évalués par un collège d’experts qui notent sur une échelle de Likert la progression de la conception sur les dimensions d’originalité et faisabilité. Une analyse statistique est effectuée sur les paires d’évaluations pour chaque concept, afin de déterminer la tendance de chaque outil numérique.

2.3 Résultats principaux

2.3.1 Résultats académiques

Dans un premier temps, nous montrons que la conviction du Trade-Off indépassable n’est pas avérée et nous mettons en évidence les caractéristiques des outils permettant aux designers de simultanément augmenter l’originalité et la faisabilité et ce, *via* la finesse d’analyse de notre modèle. Nous appelons cette capacité «originalité acquise». L’«originalité acquise» correspond à la propriété pour un concept de répondre de manière générative à une contrainte spécifique sans condition. Dans ce cas précis, elle est directement liée à la propriété particulière de l’outil à modéliser exclusivement des surfaces dites de qualité.

Bien plus, cette originalité est dite acquise car elle a été accumulée. Il n’existe pas de contrainte ultérieure qui viendrait contredire cette propriété. Les autres dimensions de l’objet qui demeurent à concevoir sont indépendantes et pourront être envisagées séparément. Lorsque de telles dimensions seront conçues, elles ne viendront pas remettre en cause l’originalité des surfaces préalablement résolue. Ainsi, les ateliers visant une performance créative devront être structurés par

le nombre de contraintes sur l'objet. De manière connexe, il sera nécessaire de doter les concepteurs d'un espace au sein duquel l'annotation et la désignation des contraintes sont spécifiées dans un langage commun.

2.3.2 Résultats industriels

D'un point de vue industriel, ce résultat se traduit par une capacité à prescrire la création d'outils capables d'améliorer simultanément robustesse et générativité en exploitant l'«originalité acquise» sur d'autres types de qualité de surfaces, et par extension d'autres types de contraintes. Nous développons alors des ateliers visant à exclusivement acquérir certains "styles" particuliers, ceux-ci étant des jeux de paramètres contraints ensemble par des règles. La Figure 2.1 montre ainsi ce que seraient les résultats d'un atelier gérant le «style origami». Enfin, les interfaces associées à de tels ateliers doivent autoriser l'accès à deux modes de conception : la manipulation directe ainsi que la paramétrisation.



FIGURE 2.1 – Le «style origami» peut être réduit à une configuration de contraintes spécifique, comme des surfaces planes reliées par des angles vifs.

Chapitre 3

Article 1 :Solving the dilemma between robustness and generativeness : the use of new design software at the design gap

Arrighi Pierre-Antoine, Pascal Le Masson et Benoit Weil

CGS Mines ParisTech

Papier présenté à l'IPDM 2012, au SIG 2013 ainsi qu'à EURAM 2013 et soumis à la revue «Creativity and Innovation Management» pour une Special issue.

Solving the dilemma between robustness and generativeness: the use of new design software at the design gap

Pierre-Antoine Arrighi, Pascal Le Masson and Benoît Weil

Are creative designers doomed to sacrifice creativity when integrating new product development processes? Although many studies point to the need to produce original and innovative designs, it remains difficult to maintain creativity during the design process and its industrial constraints. We propose to analyze the product design process through the lenses of design theories and to show that there is a strong debate about the management of the robustness and generativeness of design. This issue is again found within design tools themselves. Some of these tools offer great freedom, such as sketching, but poor convergence, whereas archetypal computer-aided design (CAD) tools tend to offer great capacities for transferring knowledge but circumscribe creative thinking. However, a new generation of design software has recently emerged seeking to address this trade-off. Based on a comparative experiment of two generations of CAD tools, we assessed their respective performances during the design gap and found that the new generation of CAD tools significantly increased both the generativeness and robustness of designs. This improvement seems to be correlated with the capacity to provide embedded constraints yet with great freedom of action to designers. This experiment confirms that it is possible to ground creativity on constraints and shows the possibility of new design processes characterized by their capacity to avoid loss of originality and to improve what we call “acquired creativity” throughout the design process.

‘What is not **constrained** is not **creative**.’ Philip Johnson-Laird

Introduction

Many studies show that industrial design is key to triggering, fostering and sustaining innovation (Olson, 1998) (Verganti, 2006) (Verganti, 2008). However, the unique creative and innovative capacities of designers make them difficult to fit into industrial environments. The challenge for firms is to provide industrial designers (IDs) enough freedom in acting to preserve their specificities while guaranteeing that their work can be compatible and assimilated by the industrial design process. Can very creative professionals be integrated in an industrial design process without damaging or restraining their specific competencies? The literature describes different approaches and advice for combining creativity and the management of industrial constraints in design such as fabrication, costs and environmental issues. However, the best timing for integrating and exploiting the innovative potential during the new product development (NPD) process is still debated.

For some researchers, fostering creativity at the beginning of the design is a necessity. This approach, which was popularized first by scientists working mostly in the car design process (Fujimoto, 2007), is now proposed by publications revolving around the fuzzy front-end approach for NPD (Khurana & Rosenthal, 1997) (Reid & de Brentani, 2004). The conformity of the design to industrial constraints

seems reachable only once the creative potential is fully exploited and consumed. In this scheme, very high creativity at the beginning of the design process appears to be the best guarantee for the maximum degree of freedom, which will not be consumed until the end of the design process (Karniel & Reich, 2011).

A different community introduces the design process as a succession of iterative steps that all require the capacity to challenge previous choices, to continuously “reframe the problem” with creativity. Donald Schön (Schön, 1984) (Schön, 1990) was one of the first to consider design as more than a problem-solving activity. The management of constraints during the process is therefore coupled with creativity and originality. Constraints can trigger innovation, and creativity can solve apparently insurmountable technical issues. As an entry for new techniques, methods or even materials, the potential for innovation helps the progress of design and the refinement of product definition. Moreover, it has been shown that recent design theories tend to support a dual improvement in robustness and generativeness, in which these two terms can be interwoven in design processes (Le Masson, Hatchuel, & Weil, 2011).

Thus, there is a research gap: are these two values inherently evolving in opposite directions during NPD or is it possible to have them grow simultaneously during NPD?

To address this complex research question, we used a tool-centric, experiment-based approach. Digital design tools are the dominant means of production for IDs, and examining their use can provide vivid evidence of their effects over design properties. These tools generate a continuous sense of excitement among designers. Because software editors use them to distinguish their products from the competition, newly released design products often include both strong technical innovations and “eye candy” interfaces. Because these software packages provide a good entry point for the integration of IDs into industrial companies, the software companies are able to recruit large numbers of clients. The large number of users results in a large pool of potential experiments. Finally, digital design tools have the very useful capacity to enhance the properties of a product in development, and this effect is particularly evident with regard to formal and esthetic properties. The tools' ability to store every step in the design process makes the intentions of users easier to track and assess.

We focus on the use of a new CAD tool by IDs, analyzed in a comparative experiment with a predecessor software. We compare the capacities of two different generations of CAD tools to investigate IDs in industrial environments and the effects of these tools on creativity. Both tools are used to generate numerical models and belong to the same software design suite. In the first tool, shapes are generated through process operations (blueprints, extrusions), whereas the second tool relies more on the paradigm of clay deformation. We assess the respective impact of the use of these two tools on the robustness and generativeness of concepts during the design process.

We first present the theoretical background underlying our research hypotheses. We then detail our experimental plan with a presentation of our experimental logic, the variables and the measures used in this study. This introduction is followed by sections in which the actual analysis of the performances of the tools, the discussion of our results and our conclusions are presented.

Motivations, Theoretical Background and Hypothesis

Many studies show that industrial design is key to triggering, fostering and sustaining innovation (Olson, 1998) (Verganti, 2006) (Verganti, 2008). These professionals, whose work activity consists notably of “transforming a set of product requirements into a configuration of materials, elements and components” (Gemser & Leenders, 2001), have great capabilities in making “products that customers love” (Cagan, 2008), and their integration leads, in most cases, to a measurable performance of the firms where they work (Berkowitz, 1987) (Tushman, Anderson, & O'Reilly, 1997). Driven by these assessments, companies try to integrate the competencies of industrial designers (IDs).

However, due to their unique creative and innovative capacities, IDs are difficult to integrate into industrial environments. The challenge for firms is to provide IDs with enough freedom to preserve their specificities while guaranteeing that their work is compatible with and assimilated into the industrial design process. Can this apparent direct trade-off between creativity and constraints be solved? *That is, can very creative professionals be integrated in an industrial design process without damaging or restraining their specific competencies?*

A divided literature regarding management of creativity and industrial constraints

For some researchers, fostering creativity at the beginning of the design process is a necessity. This approach was first popularized by scientists working mostly on the car design process (Midler, 1995) (Fujimoto, 2007).

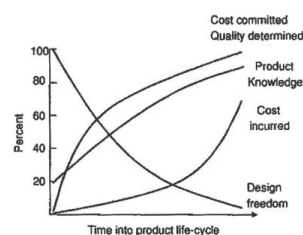


Figure 1. Product knowledge and design freedom versus time (Karniel & Reich, 2011)

Karniel and Reich (Karniel & Reich, 2011) examined the same approach based on the work of Ullman (Ullman, 2003). When conducting a new design, there is a progressive trade-off between the degree of freedom in the project (which is also constrained by the remaining possibilities of action) and the knowledge designers have about the project. The degree of freedom is directly linked to the various means of exploration (also called possibilities) that have been preserved to enable innovation and that can be used to solve the issues encountered. This freedom is consumed like capital as the design process progresses. This analytical approach has been emphasized by publications concerning the fuzzy front-end approach to new product development: “uncertainty at the fuzzy front end is greatest for discontinuous innovation” (Khurana & Rosenthal, 1997). A fuzzy front end also requires a maximal creativity phase at the beginning of the design process. It should be free from constraints so that the most extensive range of solutions can be considered, according to Reid and de Brentani (Reid & de Brentani, 2004). These recommendations are intended to promote an ultimate convergence toward a successful design because all the unpredicted upcoming issues have been previously anticipated by the preservation of a maximum degree of initial freedom. IDs respond to industrial constraints by augmenting their knowledge of the

product in the early innovation process, and creativity is consumed during the early phases and as freedom decreases and options become progressively out of reach.

Other scholars consider the design process as a succession of iterative steps that all require the capacity to challenge previous choices, to continuously “reframe the problem” with creativity. In Van de Ven’s “Innovation Journey” (Van de Ven, 1999), intensive and radical innovation is reached by a succession of iterative steps. Donald Schön (Schön, 1984) (Schön, 1990) was one of the first to consider design as more than a problem-solving activity: “In real-world practice, problems do not present themselves to the practitioner as given. They must be constructed from the materials of problem situations, which are puzzling, troubling, and uncertain.” Schön also states that each move is a local experiment that contributes to the global experiment of reframing the problem. In this framework, the management of constraints during the process is coupled to creativity and originality. This analysis is widespread in many research communities, which recommend including creativity phases throughout the design process (Couger, 1990). Buijs (Buijs, 2003) uses the expression “circular chaos” to refer to the design process rather than “linear logic.” These recommendations apply independently of the medium under consideration, from manual materials to CAD models (Marakas & Elam, 1997). Thomke (Thomke, 2002) indicated that any given solution or finding must be immediately assessed and tested to explore the alternatives and preserve room for innovation throughout design process. This repetitive method of instantaneous evaluation of each proposition can be executed with the help of new tools. Thomke provides an example involving CAD and its auto-experimentation capacity: “Because they received immediate feedback on the technical merit of their ideas, designers were emboldened for experiment.”

Model	NPD processes	“Innovation Journey”
Process	Linear logic	Circular chaos
Management of intensive creativity phases	At the beginning of the process	Throughout the process in iterative phases

Figure 2. Key aspects of the two approaches in the literature

Deciphering from a design theories perspective

The literature indicates two archetypal models for dealing with creativity and the management of industrial constraints. Many different words are used to qualify evanescent notions, such as creativity, innovation, originality and degree of freedom, on one hand, and industrial constraints, product knowledge and convergence on the other. Because it addresses the ID profession, which is complex and multi-faceted, we propose an approach to deciphering these different and sometimes ambiguous terms: design theories. A similar approach was used successfully by Weber (Weber, 2011) for product development.

Design theories tend to establish design propositions that can be evaluated by two criteria, according to Hatchuel and colleagues (Hatchuel, Le Masson, Reich, & Weil, 2011):

- i) their *generativeness*, i.e., their ability to produce design proposals that differ from existing solutions and design standards, and
- ii) their *robustness*, i.e., their ability to produce designs that resist variations of context.

These theories together form a consistent body of knowledge, aimed at increasing the generativeness of a design without losing its robustness. This approach can be called a “simultaneous solution” of the two criteria. From the perspective of our paper, generativeness is the value corresponding to the creativity and originality of the design, and robustness is similar to what we call the management of industrial

constraints. In some of the most well-known design theories, such as General Design Theory (Yoshikawa & Uehara, 1985), Axiomatic Design (Suh, 1990) and Concept-Knowledge (Hatchuel & Weil, 2002), practitioners are recommended to take in account these two dimensions and to manage them simultaneously throughout the entire design process to more quickly develop a product with the desired properties.

For a better definition of commonly used ID tools, we performed a literature review focused on two archetypal types and assessed their tendencies from the generativeness and robustness perspective.

Strong tropism of design tools and hypothesis formulation

Tools providing high generativeness and poor robustness

This category of tools offers a high capacity for conceptual exploration, with no or little cost, but is not integrated into the industrial process, and the design intentions can be lost during the production process. These tools are based on sketching and tend to share most of the properties inherent in sketching: they are quick, timely and inexpensive. Sketching itself is obviously one of these tools, but we can also consider clay modeling or patch working as belonging to this category due to their properties and uses during the early phases of the design process. These tools aim to provide maximum creativity for their users and are often used to present a set of possibilities at the beginning of a design process (Christiansen, Claus, Gasparin, & Storm-Nielsen, 2010). These tools are also well suited for the introduction of rapidly formalized concepts and are considered an explorative method, making them consistent with the generativeness of the process. Sketching activity makes mental models easy to represent and manipulate, and its simplicity helps the designers in reinterpretation and discussion with others (Remko, 2002), and sketching can be used as a communication tool for conveying ideas or concepts from an ID to other designers and engineers or managers, as noted by (Perks, Cooper, & Jones, 2005).

In addition to traditional “sketching” tools, digital design interfaces that mimic them have also appeared (Bae, Balakrishnan, & Singh, 2008). These tools have the same advantages, such as good support for creativity (Barone, 2004), but they also share the flaws of the traditional tools. They provide poor integration, mainly because the 3D models generated are not compatible with CAD industrial environments, and they contribute little to the robustness of the design. These tools are not assessed in this paper because they cannot be qualified as integrated. Thus, in this category of tools, robustness is traded for maximum generativeness.

Tools providing high robustness and poor generativeness

As numerical industrial tools were progressively imposed into design environments, the first generation of CAD tools gave IDs the opportunity to use the same means of operation as engineers. However, while these tools provide very good integration, they have the unwanted tendency to sacrifice creativity by restraining the possibilities of conceptual exploration. This category of tools tends to bound creativity and overlies original concepts by integrating them very early in the process, with its technical and even legal constraints.

This limitation can be explained because these tools were first designed *for engineers* (Henderson, 1999), and their first intended use was to increase the quality and robustness of designs by limiting the most costly iterations between different media (such as blueprints, prototypes and 3D models). Like sketches, the first generation of CAD tools proved to be very good coordination and collaborative tools with the

advantage of providing an unambiguous representation of the product (Thomke, 2002). These tools could generate “boundary-objects” and had good capabilities for transferring, translating and transforming knowledge across syntactic, semantic and pragmatic boundaries (Carlile, 2002) (Carlile, 2004) among IDs but also with other participants in design (managers, engineers, marketing). However, along with these qualities, the first-generation CAD tools had several drawbacks regarding the creativity of the users: circumscribed thinking (limitations on modeling possibilities), premature fixation (requiring detailed modeling too early) and bounded ideation (Robertson, Walther, & Radcliffe, 2007). IDs also complained about the lack of control and spontaneity of the tool; they felt as though their intuitive design qualities were transformed into virtual data processing (Wendrich & Tragter, 2009). Computers compartmentalize, break activities into isolated steps and focus on rigid logic and literal meanings (Diffrient, 1994), and, when using this type of tool, IDs also tended to focus on geometrical aspects and occult meaning creation (Verganti, 2008), one of their essential competencies. Thus, this type of tool trades generativeness for maximum robustness.

In conclusion, the first generation of digital tools consisted of restricted choices for IDs: on one hand, there were very creative tools, quite similar to sketching, but they were not well-suited for industrial requirements because they traded robustness for generativeness. On the other hand, very effective integrative tools for managing collaboration and industrial constraints bounded (or obliterated) ideation, trading generativeness for robustness. This literature review of the design tools for IDs seems to indicate a strong split regarding the trade-off between robustness and generativeness.

Hypothesis formulation

To confirm the properties of the first generation of CAD tools regarding trade-offs in designs, we formulate our first working hypothesis.

- **H1:** When IDs use first-generation CAD tools, they can improve the **robustness** of concepts but at the cost of **generativeness**.

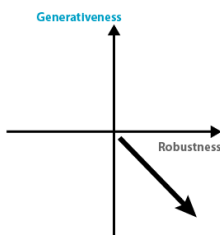


Figure 3. H1 mapped in the robustness/generativeness space

In this context, tools able to address robustness and generativeness simultaneously seem difficult to find. However, today, there is a new generation of digital tools that are integrated in product design software suites (and thus effective regarding robustness, as were the first-generation CAD tools) and simultaneously claim to maintain designers' abilities to naturally shape objects by following the logic of clay modeling or sketching in a virtual environment. It seems that this new generation of tools tends to increase robustness *and* generativeness, as some of their users claim. To assess the capacity of this new generation of CAD tools to simultaneously increase robustness *and* generativeness, we formulate our next working hypothesis.

From this perspective, does the performance of this new generation of tools differ from its predecessors and enable the simultaneous increase of robustness and generativeness of a design?

- **H2:** When IDs use new-generation CAD tools, they are able to **improve** simultaneously the **robustness** and **generativeness** of concepts.

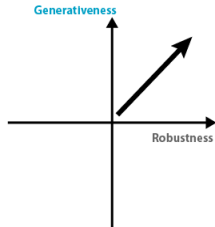


Figure 4. H2 mapped in the robustness/generativeness space

Experimental method

To test our hypotheses, we conducted an experimental protocol. We wanted this protocol to reflect real and practical uses by IDs in design situations and aimed for the interplay between their integration into the industrial design process and its impact on their creativity. To analyze how these professionals conduct their work, we focused on their means of action.

Choice of design step and tools

We focused this study on one of the most emblematic phases of the design process, namely, the transition between “traditional” and “numerical” media, sometimes called the design gap (Dorta, Perez, & Lesage, 2008). This brutal and stringent switch occurs when concepts represented with traditional means (sketches, mock-ups of any kind, prototypes) are modeled (digitized) on computers. This step is stressful for software and exposes both the limitations and capabilities of the software. The IDs find this transition critical because they fear the loss of their initial design intentions due to the switch in media from traditional to digital. The integration of concepts in the software design suite intends to support the full subsequent development to the final product. Thus, after the design gap, robustness should be increased and industrial constraints addressed, but the greatest threat is that this will be achieved at the cost of a loss in generativeness.

We chose to compare two software packages that IDs use on a daily basis to bridge the design gap. Both packages integrate hand-made sketches into the same software design suite and seek to satisfy some modeling constraints. Each design tool is a so-called “workshop” that helps the designer to transform the hand-made sketch into a digital shape, as illustrated in Figure 5.

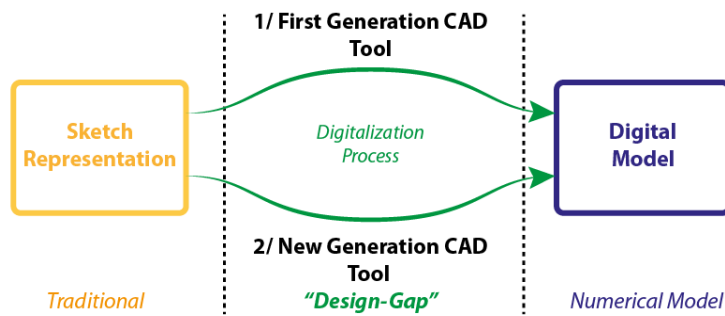


Figure 5. Managing the design gap with two different digital tools

The first workshop we tested is an archetypal first-generation CAD tool. This tool uses procedural commands, and modeling appears as a succession of steps where the construction of blueprints (called two-dimensional (2D) sketches in the software) is followed by the use of parameterizable functions (such as extrusions, revolutions or sweeps) in iterations. The tool is capable of producing surfaces of very high quality (up to Class A standard, the highest in the industry).

The new-generation CAD tool provides integration within the same design suite. The global design suite is suitable for any type of industrial design and is made of specialized workshops (i.e., other design tools for specific tasks). The models generated within the suite are fully compatible among its various workshops. Any creative design performed with either tool can then be transmitted to other designers and has the capacity to integrate industrial constraints. The models generated by the next-generation tool embed mathematical constraints that ensure the shapes generated will have a certain standard of quality at any time (curvature continuity, in this case). This tool was successfully introduced to the market in 2005 and is now used by many clients. It also differs radically from its precursor through its user interface. The manipulation of the modeled objects is direct and provides instant feedback via a “manipulation box.” This process also allows a very high degree of precision in the creation and modification of shapes. IDs can work with substantial control and speed over the formal properties of concepts without invoking commands, functions or even parameters. Interestingly, users sometimes qualify this tool as a type of clay modeler.

Design briefs used in the experiment

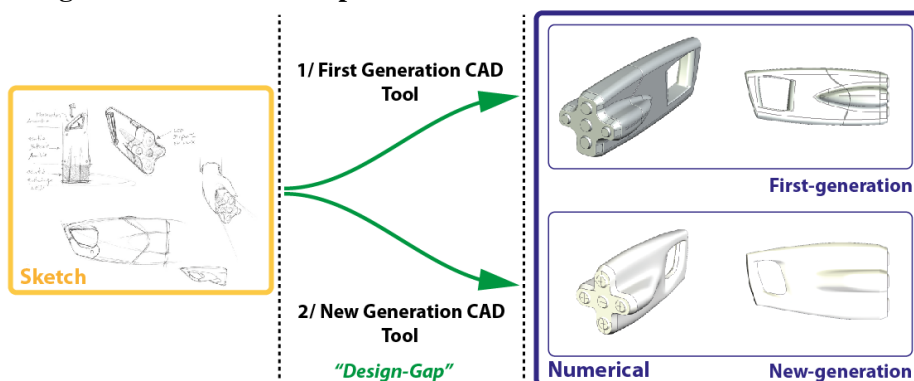


Figure 6. Materials collected before and after the design gap

IDs in most companies typically cross the design gap with first-generation CAD tools because they serve as direct entry points to the industrial world and its CAD codifications and specifications, which are required for the upcoming manufacturing process. Our goal is to assess the capabilities of the recently introduced new-generation tool and to compare it with its predecessor to determine whether these new tools can verify H2. We assessed their respective performances during this digitalization step (called the design gap in the literature), as illustrated in Figure 6.

For the experiment, we worked with six IDs from a well-known CAD company. All of the participants had ID educations and worked as designers for three to 20 years using these tools or similar ones. Thus, they experimented with each of the tasks they had to fulfill: generate sketches (before the design gap) and model them in 3D with both numerical tools (bridging the design gap).

The IDs were given design briefs, describing precisely what was expected from them.

- In the first step, the IDs were asked to produce two different concepts of an “autonomous portable lamp,” representing them with sketches. Each of the IDs was given full access to ideation materials: pen, paper, pencils, erasers and a computer with graphing software. They had one hour to complete their design and were free to ask any questions. When they were finished, their sketches were collected and scanned.

- Next, the IDs were asked to make 3D models of both their sketched concepts with both CAD modeling tools, first and new generation. They had one hour for each concept modeling, for a total of two hours. The IDs actions were recorded throughout the experiment. To avoid any learning effect, we randomized the modeling; half the IDs started with the first-generation software, the other half with the new generation.

Data and evaluation protocol

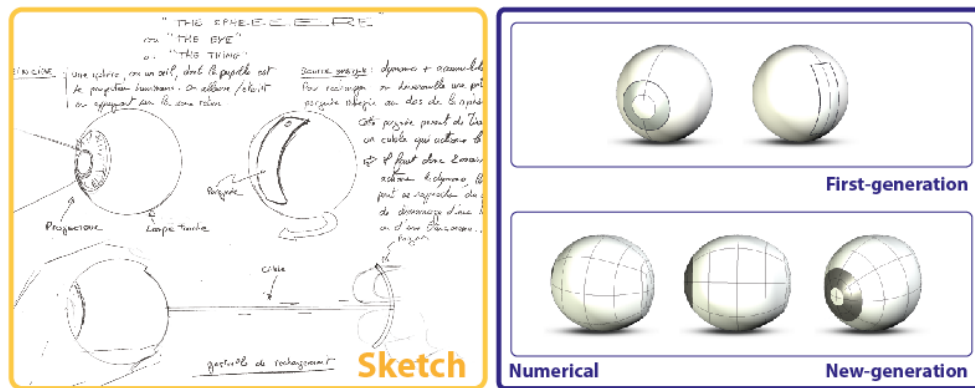


Figure 7. Representations collected for Concept 4

For each sketched concept, we obtained two sampled numerical representations, for a total of 24. Figure 7 shows the collection of sketches and 3D models for one concept.

For an assessment of their respective contributions to design robustness and generativeness in the design gap, originality and feasibility items were scored according to the literature (Runco & Charles, 1993) (Magnusson, 2003). The formal originality of a concept is consistent with the generativeness of a design.

A highly original shape is a guarantee of a high creative potential, which will be available for exploration and innovation throughout the design process. This originality of design is uncommon and surprising and can reveal new meanings. The formal feasibility of a concept is similar to the robustness of a design. A feasible shape will enable a simplified design with fewer unknowns and difficulties; it exhibits refinements and detailing; and it has a given quality of surface, which can be rated and evaluated over mathematical and optical criteria. This choice of items was later backed by interviews with IDs.

We provide a graphical example of what is called surface quality. Along with the visual criteria, it is also possible to describe the quality of the shape mathematically (see Figure 8).

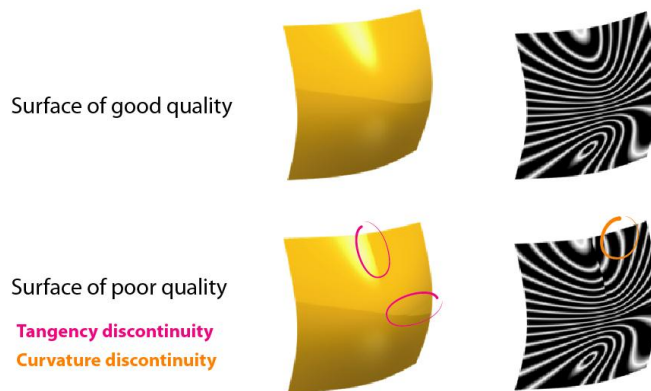


Figure 8. Evaluation of surface quality

To evaluate the evolution of feasibility and originality during the design gap, we used an expert evaluation, the “Consensual Assessment Technique” (CAT), developed by Amabile and colleagues (Amabile, 1996). We selected five different IDs who were experienced in assessing design concepts and worked as managers. These IDs were used to rapidly evaluating projects under development and will be referred to as “experts” in the rest of this article. To enable these experts to perform the evaluation of the feasibility and originality evolution, we provided them with the reference sketch for each concept and its pair of digital 3D models. They rated the progression of feasibility and originality of the concept’s shape from the sketch step to the digital model using a Likert (Likert, 1932) scale of five items: strong decrease (-2), decrease (2), neutral (0), increase (+1) and strong increase (+2). The experts conducted the process twice: once for the first-generation CAD tool model and again for the new-generation CAD tool model.

In the end, we obtained two evolution grades for each concept and modeling tool type: one for the feasibility evolution and the other for originality evolution. Working with 12 concepts and 24 numerical models, we came up with a total of 48 evolution grades.

To assess the respective impact of each CAD tool on concept feasibility and originality, we calculated the progression for each modeled concept property as the mean of all five experts' scores. The result is an aggregated Δ Originality (ΔO) and a Δ Feasibility (ΔF) for each numerical concept, matched with the tool used. This result can be mapped on the Δ Feasibility - Δ Originality space and provides a design gap performance measure for a single concept depending on the tool used.

Results

Quantitative results

As described above, we characterized the design gap performance of the tools and mapped it in the $\Delta\text{Originality}$ – $\Delta\text{Feasibility}$ space. When the experts rated a strict progression of originality and feasibility ($\Delta O < 0$ and $\Delta F > 0$), the concept was simultaneously more original and feasible after the design gap. We call this a simultaneous solution. For a diminution in originality and a progression in feasibility ($\Delta O \leq 0$ and $\Delta F \geq 0$), the concept gained feasibility but at the cost of its initial originality. We call this a trade-off. In other configurations, there is a strict decrease in feasibility ($\Delta F < 0$), which could indicate a gain (“Other1”) or a loss (“Other2”) in originality. The results of the evaluations of the progressions are illustrated in Figure 10 for each tool.

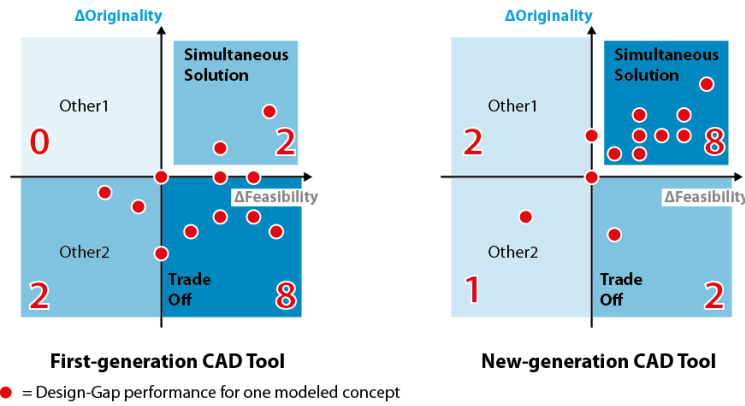


Figure 9. Map of the design gap performance of first- and new-generation CAD tools

The results are visually eloquent, but we will now test our hypotheses statistically.

H1-0 hypothesizes that the design gap performance of the first-generation CAD tool leads to a uniform distribution among the four different sectors: trade-off, simultaneous solution, “Other1” and Other2.” We test H1-0 with a χ^2 test for a two-sided 2.5% trust interval. We obtain for the χ^2 a total distance of 12, superior to the table distance of 9.3. Thus, we can reject this proposition of H1-0 and formulate a *non-uniform* distribution of design gap performance for first-generation CAD tool. We next test whether there is a significant difference among the proportions of trade-off, simultaneous solution, “Other1” and Other2.” A difference is evident in trade-off occurrences, as seen by looking at the confidence intervals on a two-sided 5% trust interval: with 8 of 12 concepts, the frequency of TO is $66.7\% \pm 22.3\%$, whereas for simultaneous solution, the frequency is $13.7\% \pm 17.6\%$. Thus, the trade-off frequency is significantly superior to simultaneous solution frequency (and “Other1” and “Other2”). Therefore, we can conclude with **H1: when IDs use first-generation CAD tools, they can improve the formal feasibility of concepts but at the cost of formal originality.**

H2-0 hypothesizes that the design-gap performance of the new-generation CAD tool leads to a uniform distribution among the four different sectors: trade-off, simultaneous solution, “Other1” and Other2.” We test H2-0 with a χ^2 test for a two-sided 2.5% trust interval. We obtain for the χ^2 a total distance of 11.3, superior to the table distance of 9.3. Thus, we can reject this proposition of H2-0 and formulate a *non-uniform* distribution of design gap performance for the new-generation CAD tool. We next test whether

there is a significant difference among the proportions of trade-off, simultaneous solution, “Other1” and Other2.” A difference is evident in simultaneous solution occurrences, as seen by looking at the confidence intervals on a two-sided 5% trust interval: with 8 of 12 concepts, the frequency of simultaneous solution is $66.7\% \pm 22.3\%$. For trade-off, the frequency is $13.7\% \pm 17.6\%$. Thus, the simultaneous solution frequency is significantly superior to the trade-off frequency (and “Other1” and “Other2”). Therefore, with respect to **H2**, we can conclude the following: **when IDs use the new-generation CAD tool, they can improve the formal feasibility and originality of concepts simultaneously.**

Qualitative results

In addition to the quantitative results we obtained, we performed a qualitative analysis of the formal evolutions the concepts examined. It seems that there could be at least two different types of formal originality revealed in our study. The first type would not be specific and would depend on the global shape of the concept. This type of originality is what the experts assessed in our experiment using criteria such as the following:

- The shape appears to be very difficult to produce.
- The cultural context is not clear.
- The shape seems iconic.
- The shape is very exact and simple.

We call the second type of formal originality “*acquired originality*.” This type is consistent with originality that can be embedded in the feasibility of the concept. Indeed, the new generation of CAD tool enables infinite possibilities for the generation of shapes so long as they comply with the internal rules of its mathematical model. From this point of view, every original shape will at least respect some pre-established rules of surface quality. Thus, the software design tool ensures that any object in the workshop is always at the A level of optical quality. The software achieves this quality criterion continuously, enabling a high level of feasibility. Interestingly, several designers play with this rule by exploring the space of possible shapes to design shapes that are optically correct and are still original and unexpected at this level of optical quality. Through this exploratory process, these designers also gain in originality.

However, this originality is still *based on* validated optical criteria. Thus, one can consider that the originality is validated as well. The two dimensions, feasibility and originality, are now coupled together in a positive way: if one wants to maintain the optical quality, then one will keep the shape and the originality associated with it. Conversely, reducing shape originality would not increase robustness but, rather, would decrease the optical quality and hence decrease robustness. Freezing the degree of freedom of the shape increases robustness *and increases originality*. Thus, one can speak of “robust originality” or “acquired originality.”

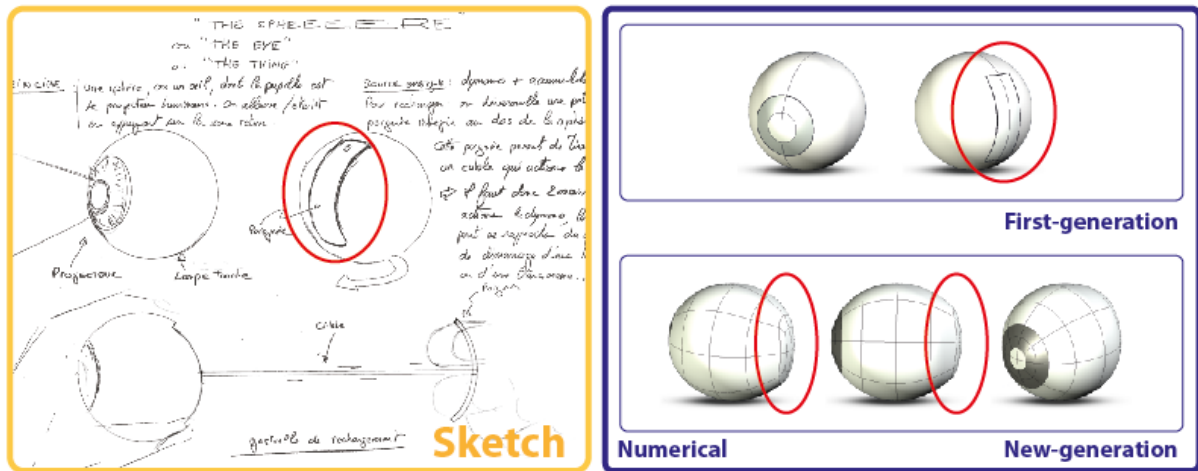


Figure 10. Appearance of a new shape attribute using the new-generation CAD tool

Acquired originality can be seen clearly in the example in Figure 10. We can note the appearance of a new shape attribute and a slight modification of the shape. The ovoid has a surface quality provided by the new-generation CAD tool numerical model, but it is more surprising and original than the almost-perfectly spherical model above. The designer was able to alter the spherical design while maintaining optical quality. He *added* a facet that was not in the original sketch and is not usually associated with A-level optical quality (A-level optical quality favors strong surface continuities, whereas facets tend to introduce discontinuities). The constraint led to originality, and the originality was acquired jointly with robustness.

The *acquired originality* of the shape is explained by its being both “*qualitative*” and “*original*.” Thus, the quality constraint has become a trigger of creativity. This finding may at first appear surprising, but the literature on multiple domains has many examples of creativity increased by constraints, as brilliantly illustrated by G. K. Chesterton: “Art consists of limitation. The most beautiful part of every picture is the frame.”

Discussion and Further Research

Limitations

Due to the exploratory nature of this experiment, there are some limitations to our findings. The first restriction concerns the limited number of representations, concepts and IDs used in the experiment. This limitation may have serious misleading effects, even if our results seem to indicate a global trend that supports our findings. The design of the experiment (a comparative empirical study that resulted in paired samples) helped to achieve a high confidence level despite the small sample size. The shape originality and feasibility offered by the modeling tools could be correlated with the type of concept, in our case an “autonomous portable lamp.” It would be useful to conduct our experiment with concepts depicting various products from various industries.

Side Findings and Further Developments

Sketching is not the only representation used for concept exploration by IDs. They also often manipulate clay models, 3D digital models made with “3D artist”-type tools, prototypes and even photomontages. It would be useful to measure the progression in shape originality and feasibility when transitioning from these media to 3D industrial models.

This study may also be extended to test another configuration of the industrial design process. IDs often do not themselves produce every representation of a concept they are working on, even in the first stages of the design process. They are sometimes helped by modelers, who are in charge of modeling the IDs' proposals in a 3D CAD environment. It would be interesting to perform the same experiment with only a few concepts produced by a same experienced ID and to evaluate how different modelers with both first- and new-generation CAD tools would address the design gap.

In future work, we propose to vary the evaluation methods of the experts by providing them with efficient 3D viewers we have prototyped to enable a different perception of the numerical models provided. We also note that the time IDs took for modeling the different representations of their concept was correlated strongly with the tool they used. First-generation CAD tool modeling took approximately 40% longer than modeling using the new-generation CAD tool. In addition to these tools' respective contributions to the design of the products, it would be very interesting to assess their respective productivity in another experiment. We also plan to obtain further understanding of acquired originality and to try to model it, and how it could be obtained in different contexts.

Finally, we could use this method of evaluation based on robustness and generativeness for different digital design tools. This method would be particularly suited for requirements tools. Requirement tools are used to manage the list of wanted properties for a product which does not yet exist. We could also use our findings to select interesting properties of the new-generation CAD tools and add them to other digital design tools to make their users simultaneously more creative and integrated.

Conclusions and Managerial Implications

Conclusions

The results of this experiment include several new findings and confirm some results in the literature. The dominant industrial tools, software similar to the first-generation CAD tool used, have a powerful capacity to dramatically improve the robustness of a design but at a cost to its generativeness. In contrast, the new-generation CAD tool provided better management *and* preservation of generativeness while enabling a similar improvement in robustness. Although further research is required to confirm these findings, as well as the capacity of the new-generation CAD tool to provide no trade-off design processes, this study provides an important lead for the pursuit of these insights.

Managerial Implications

With procedures such as the new-generation CAD tools and their capacity to perform simultaneous solution during design processes, IDs may be able to manage the generativeness and robustness of their designs to best fit the needs of their companies at any given moment. With such capabilities, the design process could be revised and its versatility and robustness improved markedly, as illustrated in Figure 11.

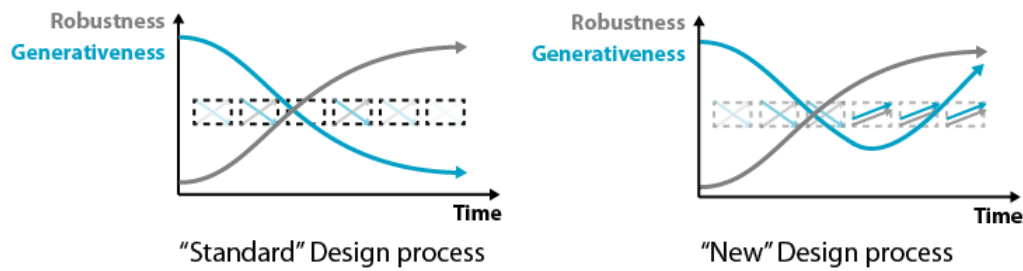


Figure 11. "Standard" and "New" design process profiles

This experiment also suggests that with tools now able to enhance robustness and generativeness of concepts simultaneously, a new design process could be imagined and applied in industry. This process would have properties differing from trade-offs and offer designers the capacity to add robustness and/or generativeness as needed.

Acknowledgments

All of the participating industrial designers and experts took time from their work to perform this experiment. We thank them for their time, consideration and effort as well as the CAD company where we performed the experiments.

Bibliography

- Amabile, T. (1996). *Creativity In Context: Update To The Social Psychology Of Creativity*. West View Press.
- Bae, S.-H., Balakrishnan, R., & Singh, K. (2008). *ILoveSketch: As-Natural-As-Possible Sketching System*. Toronto: Department of Computer Science, University of Toronto.
- Barone, M. (2004). *The Process Improvement Impact on the Styling Workflow*. EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling. EuroGraphics Digital Library.
- Berkowitz, M. (1987). Product shape as a design innovation strategy. *Journal Of Product Innovation Management* , 274-283.
- Buijs, J. (2003). *Modelling Product Innovation Processes, From Linear Logic To Circular Chaos*. *Creativity And Innovation Management* , 76-84.
- Cagan, M. (2008). *Inspired: How To Create Products Customers Love*. SVPG Press.
- Carlile, P. R. (2002). A Pragmatic View Of Knowledge & Boundaries: Boundary Object In New Product Development. *Organization Science* .
- Carlile, P. R. (2004). Transferring, Translating, and Transforming: An Integrative Frame work For Marnaging Knowledge Across Boundaries. *Organization Science* , 555-568.
- Christiansen, J. K., Claus, V. J., Gasparin, M., & Storm-Nielsen, D. (2010). Living Twice: How a Product Goes through Multiple Life Cycles. *Journal Of Product Innovation Management* , 797-827.
- Couger, D. J. (1995). *Creative Problem Solving And Opportunity Finding*. Hinsdale: Boyd & Fraser Pub. Co.

Couger, D. J. (1990). Ensuring creative approaches in information system design. *Managerial and Decision Economics* , 281-295.

Diffrient, N. (1994). Confessions of a Reluctant Technologist. Design Management Institute .

Dorta, T., Perez, E., & Lesage, A.-M. (2008). The Ideation Gap: Hybrid Tools, Design Flow And Practice. *Design Studies* , 121-141.

Friedmann, S., & Vicki, T. (2008). Knowledge Transfer: Industry, Academia, And The Global Gift Market. *Design Management Journal* , 69-81.

Fujimoto, T. (2007). Competing to Be Really, Really Good: The Behind-The-Scenes Drama of Capability-Building Competition in the Automobile Industry. Paris: Broché.

Gemser, G., & Leenders, M. A. (2001). How integrating industrial design in the product development process impacts on company performance. *Journal Of Product Innovation Management* , 28-38.

Goffin, K., Micheli, P., Jaina, J., & Verganti, R. (2011). Industrial Designers And Their Role In New Products Development. Delft.

Hatchuel, A., & Weil, B. (2002). La théorie C-K : Fondements et usages d'une théorie unifiée de la conception. Colloque « Sciences de la conception » (Lyon 15-16 mars 2002).

Hatchuel, A., Le Masson, P., Reich, Y., & Weil, B. (2011). A Systematic Approach Of Design Theories Using Generativeness And Robustness. International Conference On engineering Design. Kovenhavn.

Henderson, K. (1999). On Line and on Paper: Visual Representations, Visual Culture, and Computer Graphics in Design Engineering. Cambridge: MIT Press .

Karniel, A., & Reich, Y. (2011). Managing The Dynamics Of New Product Development Processes: A New Product Lifecycle Management Paradigm. London: Springer.

Khurana, A., & Rosenthal, S. R. (1997). Integrating the Fuzzy Front End of New Product Development. *Sloan management review* , 103-120.

Le Masson, P., Hatchuel, A., & Weil, B. (2011). The interplay between Creativity Issues and Design Theories - A New perspective for Design Management studies. *Creativity And Innovation Management* , 217-237.

Likert, R. (1932). A Technique For The Measurement Of Attitudes. *Archives Of Psychology* , 1-55.

Loewy, R. (1963). La Laideur se vend mal. Gallimard.

Magnusson, P. (2003). Managing User Involvement For Service Innovation - Findings From End User Telecom Services Innovation. *Journal Of Service Research* .

Marakas, G. M., & Elam, J. J. (1997). Creativity Enhancement in Problem Solving: Through Software or Process? *Management Science* , 1136-1146.

Midler, C. (1995). Project Management and Temporary Organizations "Projectification Of The Firm: The Renault Case". *Scandinavian Journal Of Management* , 363-375.

Olson, E. (1998). Design Strategy And competititve Advantage. *Business Horizons* , 55-61.

Perks, H., Cooper, R., & Jones, C. (2005). Characterizing The Role Of Design In New Product Development: An Empirically Derived Taxonomy. *The Journal Of Product Innovation Management* , 111-127.

Reid, S. E., & de Brentani, U. (2004). The Fuzzy Front End of New Product Development for Discontinuous Innovations: A theoretical Model. *Journal of Product Innovation Management* , 170-184.

Remko, V. D. (2002). Brainsketching And How it Differs From Brainstorming. *Creativity And Innovation Management* , 43-54.

Robertson, B. F., Walther, J., & Radcliffe, D. F. (2007). Creativity And The Use Of CAD Tools: Lessons for Engineering Design Education From Industry. *Journal Of Mechanical Design* .

Runco, M. A., & Charles, R. E. (1993). Judgments of originality and appropriateness as predictors of creativity. *Personality and Individual Differences* , 537-546.

Schön, D. (1990). *Educating the Reflective Practitioner*. Jossey-Bass Inc.

Schön, D. (1984). *The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action*. Basic Books.

Suh, N. P. (1990). *The Principles of Design*. New York: Oxford University Press.

Tessarolo, P. (2006). Is Integration Enough for Fast Product Development? An Empirical Investigation of the Contextual Effects of Product Vision. *Journal Of Product Innovation Management* , 69-82.

Thomke, S. H. (2002). *Experimentation Matters: Unlocking The Potential Of New Technologies For Innovation*. Harvard Business School Press.

Tushman, M. L., Anderson, P. C., & O'Reilly, C. (1997). Technology Cycles Innovation Streams And Ambidextrous Organizations. *Managing Strategic Innovation And Change* , 3-23.

Ullman, D. G. (2003). *The Mechanical Design Process*. New York: McGraw-Hill.

Van de Ven, A. H., Polley, D. E., Garud, R., & Venkataraman, S. (1999). *The innovation journey*. New York: Oxford University Press.

Verganti, R. (2008). Design, meanings and radical innovation: A Meta-Model And A Research Agenda. *Journal of Product Innovation Management* .

Quatrième partie

Des processus de conception renouvelés par des ateliers innovants : vers un changement de perspective sur la nature de la conception

Chapitre 1

Contexte de l'article «Managing radical innovation as an innovative design process» par rapport à la thèse

Le modèle stratifié reformule la logique de l'accumulation lors du processus de conception. Plus spécifiquement, le modèle stratifié met en évidence l'importance de la capitalisation des connaissances dans la suite logicielle lors du processus de conception et la nature de ce qui est conçu. Il s'agit d'une approche « macroscopique » du processus comme l'illustre la Figure 1.1. Nous nous intéressons ici à l'impact des processus eux-mêmes aux ateliers qu'ils mobilisent, et au résultat de la conception.

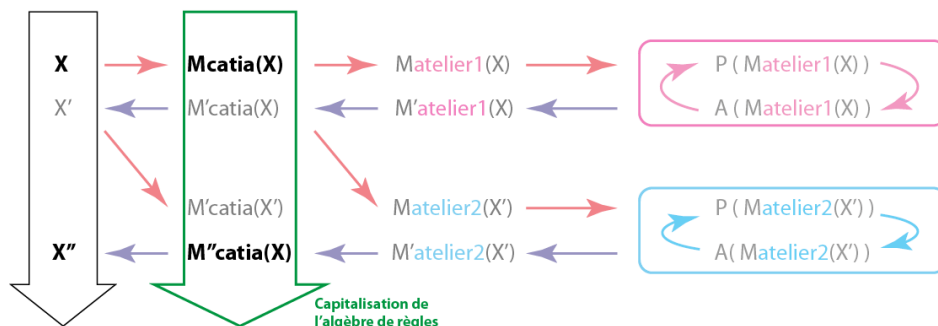


FIGURE 1.1 – Le modèle stratifié montre que l'évolution du concept et de sa modélisation dans la suite logicielle ne sont pas le résultat d'un raffinement successif. Approche «macroscopique».

Reconsidérons alors la seconde hypothèse du modèle séquentiel :

Hypothèse 2 : Les avatars, multiples représentations de l'objet en cours de conception dans la suite numérique, résultent de couches juxtaposées de conception qui correspondent à un raffinement progressif de l'objet.

Grâce à notre modèle stratifié, nous émettons alors l'hypothèse suivante :

Hypothèse 2' : Les avatars ne sont pas le résultat de couches juxtaposées qui proviendraient d'un raffinement progressif de l'objet. Ils sont l'instanciation à un moment précis d'un algèbre de règles qui est généré au cours de la conception. Cet algèbre de règles est produit au sein des ateliers et capitalisé au niveau de la suite logicielle (flèche verte épaisse).

Chapitre 2

Résumé de l'article «Managing radical innovation as an innovative design process»

2.1 Problématique et enjeux

La littérature académique des années 1990 identifie des modèles du processus de conception qui favorisent plutôt contrôle ou exploration. Des propositions capables de supporter leur exploitation simultanée sont considérées comme extrêmement délicates voire impossibles. Cela dit, certains modèles plus récents considèrent qu'une telle réalisation est envisageable, avec certaines restrictions, et proposent des moyens de mise en œuvre.

Le premier modèle, dénommé «architecture modulaire», consiste à permettre des innovations circonscrites. Ces dernières se déroulent au niveau des modules qui doivent respecter des règles de compatibilité avec l'architecture générale. Quant à cette dernière, elle orchestre la convergence générale de la conception. Ce modèle rend difficile voire impossible une modification d'architecture une fois celle-ci fixée. Le second modèle s'appelle «glissement de concept» et repose sur une capacité en cours de développement à réutiliser une certaine part des connaissances déjà développées pour générer un nouveau concept. Cette capacité permet d'aboutir à des innovations radicales, mais la part des connaissances réellement capitalisée reste floue et le contrôle de l'innovation incertain. Par la mobilisation de cas similaires à ces deux modèles, nous souhaitons analyser le rôle et l'impact des outils numériques sur ce type de conception.

En effet, est-il possible d'identifier des processus industriels de conception, auxquels participent des designers industriels créatifs, qui parviennent à réali-

ser simultanément contrôle et pilotage de l'innovation ? Si oui, quelles sont les propriétés des outils qu'ils mobilisent ?

2.2 Méthodologie opérée

Forts de notre hypothèse 2' reformulée, nous allons analyser l'accumulation des connaissances et de données du produit ainsi que les étapes de conception réalisées à l'aide d'outils de CAO. Pour ce faire, nous sélectionnons deux cas d'étude aux propriétés intéressantes. En effet, il s'agit de contre-exemples du modèle d'«architecture modulaire» et de «glissement de concept». Lors de ceux-ci, les designers industriels sont astreints à se satisfaire de processus peu optimisés mais sont étonnamment parvenus à obtenir dans chaque cas des innovations radicales grâce à leurs outils numériques. Nous appliquons un modèle d'analyse issu de la littérature de gestion nous permettant de suivre précisément quelles ont été les connaissances et leurs évaluations, noté par le Value Management (VM). Nous utilisons également le modèle pour caractériser les entrées/sorties des étapes d'utilisation des outils de CAO, notés les Design Spaces (DS). Ce modèle DS/VM offre un suivi facilité des évolutions des processus de conception ainsi qu'une compréhension améliorée des innovations possibles, et ce en soulignant les propriétés profitables des outils numériques.

2.3 Résultats principaux

2.3.1 Résultats académiques

Les processus modélisés corrélerent résultats innovants et certaines propriétés des outils. Les avatars sont en fait la paramétrisation à une étape donnée de la base de règles générée lors de la conception. L'accumulation des connaissances est opérée sur la base de règles sauvegardée par l'outil. Lorsque des concepteurs utilisent des outils numériques de conception industriels, ceux-ci intègrent des propriétés qui conservent leurs actions dans un arbre de conception qui est une des incarnations de l'algèbre. Cet arbre de conception enregistre les fonctions ainsi que leurs paramètres qui décrivent une représentation géométrique du produit. En faisant varier les paramètres et fonctions, il est alors possible de moduler les représentations et donc d'accéder à d'autres instanciations du produit lorsqu'il sera conçu. Par ailleurs, une telle capacité est intrinsèquement liée aux ateliers eux-mêmes. En fonction des entrées/sorties avec lesquelles ils sont compatibles, ils contribuent plus ou moins à la base de règle. La puissance des outils de CAO pour l'industrie est ainsi associée à leur aptitude à accumuler des bases de règles extrêmes denses, détaillées et complexes.

Comme nous l'avons caractérisé précédemment, les outils les plus performants en termes d'innovation intégrable, ou d'«originalité acquise» offrent un environnement de conception (une scène) dans laquelle le concepteur dispose de ressources spécialisées aptes à traiter une contrainte bien identifiée. Ceci est mis en évidence par notre nouveau modèle introduit dans la deuxième partie. Nous sommes en mesure de corréler le succès ou l'échec de l'innovation à la capacité pour l'outil de CAO de traiter précisément la contrainte sur laquelle doit porter la créativité du concepteur. Ce succès est également conditionné par la capacité pour le designer industriel d'identifier cette contrainte ou tout simplement qu'elle lui soit présentée. Ce type d'atelier permettra alors d'envisager des processus dans lesquels l'originalité intervient à tous les stades et peut (et doit) être pilotée.

Additionnement, nous proposons un modèle de suite d'outils numériques qui amplifie l'originalité d'ensemble tout en proposant un meilleur contrôle du processus. Il se dessine alors un processus par succession de contraintes génératives pour lesquelles il s'agit de disposer d'outils spécifiques. Ceci conduit à imaginer de nouveaux processus reposant sur de telles contraintes et de nouveaux espaces associés pour les traiter, à savoir la création d'es ateliers inédits. Le pilotage par contrainte amène donc à reconsidérer des ateliers prévus pour un ensemble hétéroclite de concepteurs dans lesquels ils pourraient se révéler être tous créatifs. Les concepteurs concernés pourront alors traiter la conception au sein d'un atelier préexistant ou en créant leur « scène » sur mesure. Dans tous les cas, il semble nécessaire de proposer une plateforme fédérant des ateliers orientés sur des contraintes génératives corrélés par des espaces de prescription croisée.

2.3.2 Résultats industriels

Nous employons notre modèle pour proposer la première brique des ateliers de conception géométrique qui adresse les besoins communs des différents utilisateurs. Nous proposons une liste restreinte mais complète d'outils pour cet atelier destiné à adresser des besoins de prescription croisée. Il doit non seulement réunir l'intégralité des savoirs communs mais également supporter la réalisation ultérieure des autres ateliers spécialisés. Les outils sélectionnés sont issus d'une grande variété de propositions conceptuelles. L'atelier commun dispose notamment d'un outil d'annotation (cadre rouge sur la Figure 1.1) qui permet d'identifier et de prescrire la contrainte qui pourra ensuite être traitée dans un atelier dédié.

L'atelier présenté en Figure 2.1 est décrit d'un point de vue fonctionnel. Cette modélisation ne présente que les fonctions proposées dans l'atelier, sans

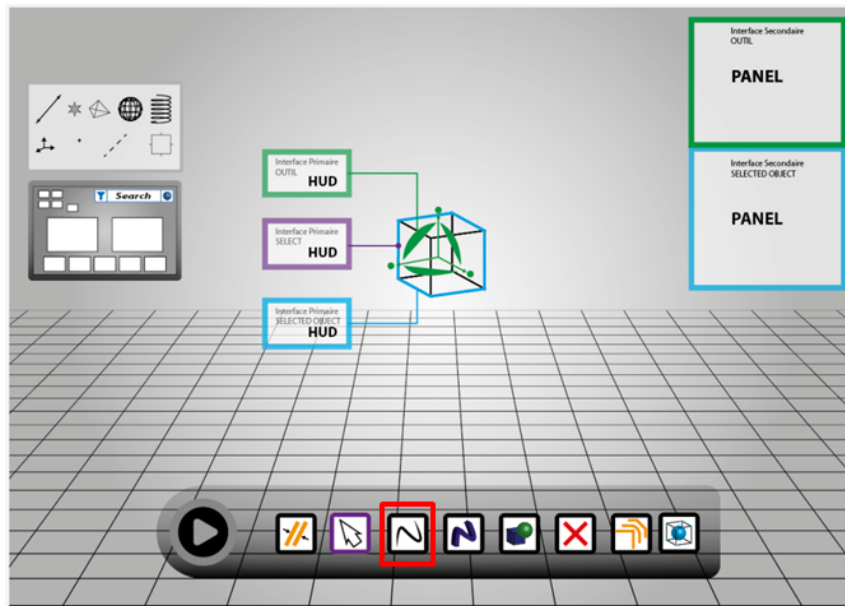


FIGURE 2.1 – Une proposition fonctionnelle d’atelier pour la conception en milieu immersif.

s’interroger sur la façon dont elles doivent être représentées. Nous pouvons noter la présence d’outils, d’interfaces de différents niveaux ainsi que l’accès aux contenus. L’objectif de cet atelier est de faciliter la prescription croisée en milieu immersif.

Parallèlement à cet atelier commun, il est nécessaire de mettre en place des ateliers spécialisés. Ces ateliers spécialisés visent à traiter des contraintes de manière plus ou moins générative ou robuste. Ce fonctionnement par silos compatibles est opposé à la vision générale des outils de réalité virtuelle qui spéculent sur un environnement unique dans lequel tous les concepteurs pourraient être créatifs.

Chapitre 3

Article 2 : Managing radical innovation as an innovative design process

Pierre-Antoine Arrighi, Pascal Le Masson et Benoit Weil

CGS Mines ParisTech

Papier présenté à l'IPDM 2013 et soumis à la revue «Creativity and Innovation Management», sélectionné comme un des cinq meilleurs papiers de la conférence.

Managing radical innovation as an innovative design process: generative constraints and cumulative sets of rules

Arrighi Pierre-Antoine, Pascal Le Masson, Benoit Weil
CGS Mines ParisTech 60 boulevard Saint-Michel 75272 PARIS Cedex 06

Pierre-Antoine Arrighi
pa.arrighi@gmail.com
01 61 62 63 24

ABSTRACT

This paper focuses on the organization of design processes and the difficulty of simultaneously achieving control and exploration when aiming to achieve radical innovation. We identified two main trends in the literature: the first proposes to decompose products into their architectural components. It provides adequate control and exploration of sub-systems at the component level but is not flexible for architecture revisions. The second trend allows for and recommends the shifting of concepts during the design process as a resource for innovation. It supports exploration but does not guarantee that innovation becomes practical. We interpreted these two models within the design spaces value management (DSVM) framework and demonstrate that these models actually address the same questions, both with restrictive hypotheses. The questions are Q1: How can one increase the efficiency of exploration? Q2: How can one ensure forms of cumulative convergence? To address these questions with study two cases that helped to discuss the restrictive hypotheses and lead to identify, despite very contrasted situations, similar patterns. We performed a case study of two projects, both of which generated radical and successful innovations. We tracked the data generated by the computer-aided design (CAD) tools and interviewed the designers. We obtained two results: 1) managing exploration consists in managing generative constraints, ie identifying critical constraints and providing design spaces to creatively deal with these constraints If the designers can manage the constraints inside specific design spaces with adequate design tools, the result will be simultaneously original and compatible with the other dimensions of the project. 2) The outcome of the design process is no longer a single product but rather a structured set of design rules, an algebra of design rules, that enable to define a family of products. These two managerial issues are in deep correspondence with contemporary research results on innovative design processes. With these findings, design practitioners and managers could take advantage of better-formulated briefs and the plasticity of the parameterized CAD models, thus opening the door to new design processes.

Keywords: Computer Aided Design (CAD), industrial designers, constraint, creativity, set of rules

INTRODUCTION

Product design teams have today to organize to develop new products that integrate features that are highly new to their technical or market experience. These radical or discontinuous innovations {Veryzer, 1998 #1652} require development processes that go beyond the NPD practices based on optimization and planning. It requires for instance exploration, try and learn {Sommer, 2004 #2702}, learning and new competence management {Christianson, 2005 #1500} or creativity {Badke-Schaub, 2010 #2530}. Hence these development processes required specific research works. A first generation of research, in the 1990s, expressed and analyzed a strong trade-off between the monitoring of the breakthrough (meaning its control) and the capacity to explore and learn during the process. New product development processes have proven efficient for control and risk management (Clark and Fujimoto, 1991; Lam and Liang, 2007), but they lack flexibility and are negatively related to innovation productivity (Harmancioglu and Durmusoglu, 2007). And research on radical innovations stories (Van de Ven and Venkartaraman, 1999) tend to demonstrate that deep and durable explorations follow ill-defined processes and that convergence control is difficult.

To address these issues, a second generation of theories attempted to bridge these two tendencies by providing simultaneously control *and* exploration. We can identify two streams of research. On the one hand, in the “modular process” model (Sanchez and Mahoney, 1996; {MacCormack, 2001 #1303}), control is guaranteed by the architecture of the product. In this model, exploration can occur at the level of “modular components” that are loosely coupled to the platform {Gawer, 2009 #1983}. Hence the product architecture “monitors” the exploration, both framing and supporting it. On the other hand, in the concept shift process model (Seidel, 2007), designers can explore a product concept not only in fuzzy front end phases but also late in the process, achieving a concept shift by modifying the concept’s components. In this case, convergence and divergence depend on leadership and teams practices. The first model relies on a “structural hypothesis” (a stable structure, the architecture of the product, warranties the exploration process); the second model on a “leadership hypothesis” (the quality of leaders warranties the quality of the initial concepts and the subsequent exploration).

Beyond their differences, these two models have a lot in common. In particular, we will show that they both rely on a strong “shift” in the approach of exploration monitoring: whereas the first generation of works tended to limit monitoring and management to decision making and selection of the “best alternative”, the modular process or the concept shift approaches consider that process management also includes the support to the divergence, exploratory part of the process. This is coherent with recent works on design processes and cognitive processes that show that managing innovative design processes actually consists in managing “de-fixation” {Archer, 1965 #2542; Jansson, 1991 #2072; Bonnardel, 2004 #2474; Agogu  , 2013 #2802; Le Masson, 2011 #2568}. Instead of managing planning and selection, the design process tends to manage efficient divergence and knowledge

accumulation. In this design perspective, radical innovation process management actually raises two questions that we will address in this paper: Q1: how to manage the process to prevent “fixation”? Q2: how to organize a cumulative process linking the multiple exploratory phases? We show more specifically that a radical innovation process management requires actually a capacity to deal with “generative constraints” (ie identify critical issue and work them out in a creative way, result 1) and to accumulate the knowledge acquired in the exploratory phases in a coherent set of rules (result 2).

To answer these research questions, we first analyze how the two models, modular and concept shift processes, already propose partial answers; we also show that these two models seem to rely on specific conditions (product structure or leadership quality). To generalize these models and underline deep similarities between them, we need to discuss these limiting conditions. To this end, we rely on case study to exhibit two counterexamples that show that these conditions are actually unnecessary. Hence we show that it is possible to generalize the last two models and to see deep correspondence between them.

To do this, we identified two relevant cases that appear at first to very closely resemble the two archetypal models: 1) a first case is very closed to a “modular process” since there are many “constraints” (just like a modular process is constrained by the product architecture) – and we show that these constraints will actually be the support for a creative solution (and in particular these constraints lead to an innovative product architecture!). 2) the second case is very close to a free concept shift (since people are able to strongly diverge from the initial concept) and we show that this shift actually relies on technical tools to focus exploration and accumulate the results. To be able to follow the design process, we use a novel way of analyzing it. We tracked the data generated by computer-aided design (CAD) tools. These data were complemented by interviews with the designers for better understanding and verification.

We first introduce the theoretical background that leads to a gap in research and the associated research questions. We then detail our method with a presentation of the cases studied, data collected, and interviews conducted. Then, the performance of the processes and how these processes are related to the existing literature are analyzed, the results are discussed, and the conclusions are presented.

THE TENSION BETWEEN CONTROL AND EXPLORATION IN INNOVATION PROCESSES

The difficulty of reaching and monitoring radical innovation

Because radical or discontinuous innovations play an important role in building competitive advantage and can contribute significantly to a firm’s growth and profitability, increasing attention has been paid to innovation management, at a time when businesses face severe competition that new product development (NPD) solutions fail to fully address (Kleinschmidt and Cooper, 1991). Much of the effort to improve NPD has focused on the process as it relates to product improvements, but there has been little research focused on radically new or different products. As

formulated by Utterback (Utterback and Abernathy, 1975) forty years ago, there are drastic inconsistencies between activities focused on productivity improvements and cost reductions and those focused on innovation and flexibility. However, both types of activities are important for firms' survival.

Radical innovation is occasionally referred to as discontinuous innovation, in opposition to incremental innovation. We follow the definition given by Veryzer (1998): a discontinuous innovation is a (strong) change of product capability and technological capability, ie the product is commercially discontinuous and/or technologically discontinuous. It accounts both for changes in the benefits of the products as perceived or experienced by the customers/users experience and/or changes in the technologies used to design the product.

A literature review of two specific generations of design process models and recommendations will illustrate the strong rise of radical innovation research and the propositions for achieving it with success.

In the 1990s, two main tendencies in the literature could be identified. The first was about the formulation of a sequential and determined process, the NPD process (Clark and Fujimoto, 1991), which is widely recognized as a key to corporate prosperity (Lam and Liang, 2007). The artificial division of the process provides management with a quality control structure in which each "gate" represents an opportunity to recognize and stop the progress of a failing project. When the criteria for passing each gate are chosen wisely, following this prescribed process is one way of assuring the quality of the resulting product (Ulrich and Eppinger, 2003). However, Cooper (Cooper, 1994), who coined the concept of a "Stage-Gate" process, argues there are many practical weaknesses to this form of tight control. The system can be inefficient such that projects must wait at a gate until all necessary activities have been completed. The overlapping of stages is impossible in most cases, although this overlap is often desirable when radical innovation is needed. Modularity is even more difficult to consider. There can be high bureaucratic overheads at each gate, and the individual project perspective means there is little provision for managing the division of resources across a portfolio. In the end, the Stage-Gate process is said to result in lower risk, immediate reward, and incremental project development (McDermott and O'Connor, 2003) but is negatively related to innovation productivity (Harmancioglu and Durmusoglu, 2007). Furthermore, Christiansen and Varnes (2009) have shown that, despite their claims, many organizations do not actually use Stage-Gate processes.

Scholars have also focused on stories of breakthrough innovations. In "The Innovation Journey" (Van de Ven and Venkartaraman, 1999), the design process is described as an innovation journey in which practitioners are mostly driven by seemingly chaotic events. This journey is also highly unpredictable and uncontrollable because a sequence of chance "blind" events cannot be anticipated. The authors observed an orderly periodic progression of stages or phases. As a result, the authors hold that no theory could reach the precision necessary to advise managers on exactly what to do and how an innovation will turn out or even how to evaluate its

risks or potential outcomes. In the end, the innovation process as described in the “innovation journey” is neither sequential nor a matter of random trial and error; rather, it should be characterized as a “nonlinear dynamic system” (Cheng and Van de Ven, 1996). This type of process can lead to radical innovation, as shown by the results of a cochlear implant case study, but they are extremely complex to manage and can require very long developments (15 years in the study case) for the program to reach full growth.

Hence this literature underlines a tension between the managerial logic of decision and control on the one hand and the creative logic of exploration, that seems to be required for radical innovation.

Modularity and concept shifts: A good fit for managing radical innovation

Some scholars have studied the contradiction between control and exploration in radical innovation processes. Instead of considering control and exploration as opposite entities, they have proposed ways of combining them. Two approaches can be identified.

Modularity

Sanchez and Mahoney (1996) proposed moving from a sequential process to a more modular way of designing products. As a first step, they propose to take earlier development constraints and modify the organization, from sequential and overlapping problem solving to modular organization of the product development process. This is the ideal organization with which to address the modular product architecture (Sanchez, 1995). It is a special form of product design that uses standardized interfaces between components to create a flexible product architecture. In modular product design, the standardized interfaces among components are specified to allow for a range of variations in components to be substituted into the product architecture (Baldwin and Woodard, 2008). The product architecture must optimize the operating performance of the product yet also facilitate making changes to the product design as new information emerges (MacCormack and Iansiti, 2001). This flexibility is supported by modular components, which are components whose interface characteristics are within the range of variations allowed by modular product architecture. This flexible process is characterized by the ability to generate and respond to new information for a longer portion of a development cycle. Product variations can be leveraged by substituting (Garud and Kumaraswamy, 1993) different modular components into the product architecture without having to redesign other components. This loose coupling of component designs within modular product architecture allows the “mixing and matching” of modular components to give a potentially large number of product variations distinctive functionalities, features, and/or performance levels (Sanchez 1995). The high degree of independence or “loose coupling” among component designs by standardizing component interface specifications is also critical for designers to bring about radical innovation by working on the components that have been defined by the specified architecture.

The modular product architecture provides a form of embedded coordination that greatly reduces the need for the overt exercise of managerial authority to achieve coordination of development processes. Processes for learning at both the architectural and component levels become more efficient. This process requires outputs of component development processes before beginning the development of components, and therefore, the revision of an already specified architecture is no longer possible.

Fuzzy front end and concept shift

Another approach to reach radical innovation performance is to modify the NPD framework. Because the design process is a succession of divergent and convergent phases, some researchers have proposed a strong divergence at the beginning of the process. This literature focuses on the front end of the process, which includes a product concept statement and evaluation, product definition, and project planning (Khurana and Rosenthal, 1997). The fuzzy front end of the NPD process is defined to include the stages prior to the actual development of a new product (Ozer, 2007). Its performance, by first allowing for greater exploration and divergence at the beginning of the process, can lead to better NPD projects: the firms are able to move faster than their competitors and are more likely to introduce a winning product. "Well begun is more than half done," as stated by one of the practitioners we interviewed.

A similar but enhanced proposal can be found in the notion of concept shifting introduced by Seidel (2007). Because initial divergence is sometimes insufficient, it could be needed later in the process. This divergence is indeed the capacity to modify the initial concept and derive new concepts from it. The concepts and knowledge are all stored. This approach is a good answer to radical innovation contexts, which can pose considerable challenges to product development teams. Goals can be unclear and changing, and existing organizational processes may be inappropriate or not well developed. Product development team members initiated a change when a concept component was found to no longer fit with technical abilities or to no longer match emergent market needs. Initial concept components (stories, new vocabulary, and prototypes) in these radical innovation cases were employed to provide a starting point, not a complete product.

A common framework to compare the two process models.

To assess how these types of process drives the exploration and control of the innovation breakthrough, we use a very simple, open, and generic model of the design process (Hatchuel, Le Masson & Weil, 2005). The design spaces value management (DS-VM) model allows us to analyze the learning and control of convergence and is adapted to the design of products with high technical specifications. It is based on the notion of design space (DS), defined as a collective working space where designers can act in a way that enables them to learn about what they want to learn for their overall design process. The DSs refer to the learning phases; at the value management level, design spaces are designated (top-down arrow) and knowledge produced in

design spaces (bottom-up arrow) is integrated. A development process appears as a sequence of DSs, each DS being derived from the VM layer and feeding the value management level in return. All the acquired results of a development process appear at the value management level: designed product(s) as well as acquired knowledge (new validated routines and competences, etc.).

In this framework we can characterize the modular design process (see figure 1 below). The architecture pre-exists or it is considered that it was designed and validated inside a preliminary Design Space in charge of exploring “architecture” alternatives. Then the design spaces for modular components are explored simultaneously. It clearly appears that product architecture structures value management: it supports the explorations and enables to integrate the results into product(s). Each modular component design space is in charge of organizing a good fit with changing external (eg market) conditions. One issue with this model is that the initial architecture cannot be revised once the architecture has been validated. In fact, there is a deep separation (represented by the vertical dashed line) between the “architecture” DS and subsequent steps. Turnover is not possible once the subsequent steps have been reached. Concept shifts are strictly impossible, as are even slight modifications of the architecture.

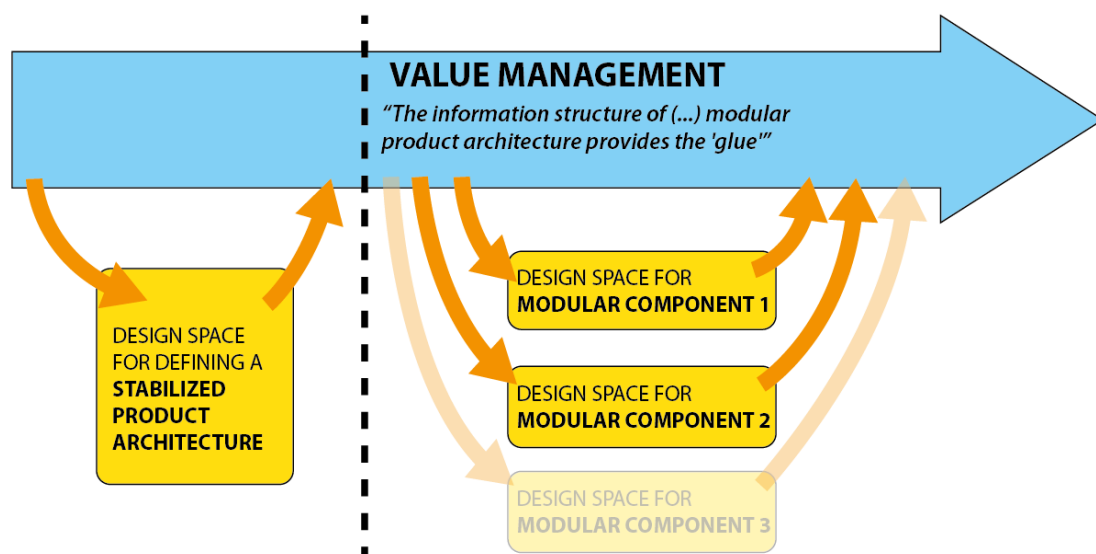


Figure 1: Model 1: DSVM model of modular design process

In the concept shift model, the DS can be simultaneously or sequentially explored. New concepts or variations of the initial concept are elaborated in design spaces and then integrated at the value management level. How are the design spaces designated? Seidel stated that concept shift occurs “when a concept component was found to no longer fit with technical abilities or match emergent market needs,” which is rather imprecise. How does one make use of the knowledge acquired in a design space? As stated by Seidel, every concept is stored, which allows for large possibilities for exploration. Still one can not be sure that the generated concepts will be useful and contribute to the VM of the full project if a new shift occurs. How can we control the

direction, duration, and moment of exploration if the finding of new concepts is not serendipitous? In the concept shift model, these questions are left to further research.

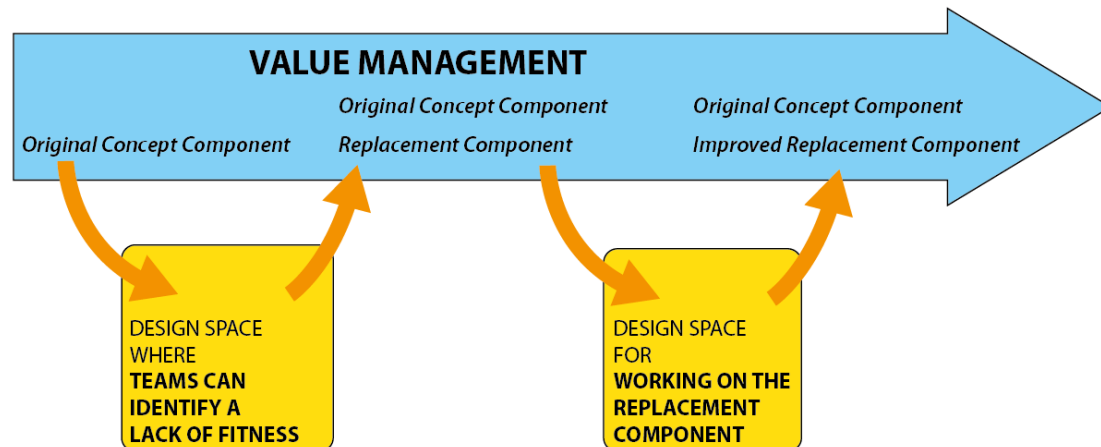


Figure 2: Model 2: DSVM model of the concept-shifting process

We now better understand the common issues and differences between the two models:

1- common features: to combine exploration and control, the two models (modular design and concept shift) actually keep phases for explorations (modular component design or phases of concept exploration in the process) and describe an integration level (product architecture or concepts storage). Doing so the two models considerably shift the perspective on radical innovation development processes:

- a- *control is no more in the selection of the “best” alternative*, it can also be in the *designation of the appropriate “design space”*— appropriate design space for modular component development or appropriate design space for concept exploration. *The control of exploration also consists in controlling the “divergence” quality*. It is interesting to underline that this approach is in full coherence with the most recent advances in design theory and creativity cognition. These works have shown that managing innovative design processes actually consists in managing “de-fixation” {Archer, 1965 #2542; Jansson, 1991 #2072; Bonnardel, 2004 #2474; Agogu  , 2013 #2802; Le Masson, 2011 #2568}. Instead of managing selection, the design process tends to manage efficient divergence.
- b- Control is not necessarily in the convergence towards a final product: in the modular design process, several complementary modular components can result from the process (ie a family of products sharing a common architecture); in the concept shift process, several concepts are stored and it is not sure which of them will be finally successfully developed. *The control of convergence can also consist in accumulating knowledge acquired along the explorations*. Here again this is in full coherence with recent advances in engineering design, which has long shown the importance of knowledge and competence accumulation to support the design process {Pahl, 2006 #1509}, not only for “continuous innovation” but also for creativity {Cropley, 2006 #1594}.

2- differences: both models rely on specific conditions. In modular design, the product architecture is a key asset to support explorations and to integrate the results from these explorations. We can say that the modular design process relies on a “structural” condition. By contrast, concept shift does not assume a structural stability of the product; it leaves “shifting ability” to process leaders and participants. This is a “leadership condition”.

We can summarize these common features and differences in the table below:

Models	Modular	Concept Shift
Exploration	Inside modular components	Based on concept shift
Convergence	Inside an existing architecture	Maintain reference to original concept

Table 1: Synthesis of both models’ capacities

In this design perspective, radical innovation process management actually raises two questions, that we will address in this paper: Q1: how to manage the process to prevent “fixation”? Q2: how to organize a cumulative process linking the multiple exploratory phases? Let see now more precisely these two questions.

Focus on the intensity of the breakthrough

The first issue to be addressed in a major innovation process is the capacity to monitor the amplitude and direction of the wanted radical innovation breakthrough. This is a common feature of both models: in modular processes, the “architecture” enables the modular exploration; in concept shift, the actors are free to shift even late in the process.

Still these two processes tend also to “limit” the monitoring of convergence by specific conditions: in modular processes, the breakthrough is framed and bounded inside the modules. The main and unbreakable constraint lies in the fixed architecture. In the concept shift process, the breakthrough is weakly driven because the link between concepts remains obscure, if not mysterious. It depends on the personal qualities of leaders and team members. Questions remain about their shared properties and the critical differences likely to bring success to one or all the concepts.

But are these conditions really necessary? It seems possible to manage richer, stronger, and more oriented breakthroughs: in the modular model framework, it would be ideal to make a breakthrough innovation possible in the architecture, not only within the components. In the concept shift framework, the breakthrough is possible but its amplification and the capacity to manage it within the concept-shifting model would be interesting. Therefore, our first research question is:

Q1: How can we monitor the amplitude and direction of exploration, without necessarily relying on a stable architecture (Q1-a) or on leadership (Q1-b)?

Focus on the convergence criteria of a radical innovation project

In the modular model, the convergence is guaranteed by the architecture and the decoupling of the respective sub-systems. Everything that has been learned at a

component level will be re-integrated within the global process due to the initial architecture phase. In the concept shift model, there is a strong accumulation of knowledge linked to the various explored concepts, but it is difficult or occasionally even impossible to identify what actually has to be stored. Value identification could be problematic. Therefore, our second research question is :

Q2: How can we organize a more cumulative convergence, without necessarily relying on a stable architecture (Q2-a) or on leadership (Q2-b)?

METHOD

Methodological approach: why case study?

We actually need to exhibit two kinds of counter-examples:

- 1- On one hand we look for a case that helps to discuss the modular process model: *the architecture of the product is known to such an extent that it leads the exploration* (it supports the control of the exploration) *but this architecture is not stable and is itself creatively redesigned during the exploration*. This will show that the condition of structural stability is actually not necessary in this model. Such a case would help us to discuss Q1-a and Q2-a.
- 2- On the other hand we look for a case that helps to discuss the concept shift model: the exploration is as free and diverging that concept shifts but it is built on well-identified exploration phases and accumulation processes. Such a case would help to discuss Q1-b and Q2-b.

Hence we are looking for two very contrasted cases that should finally illustrate very similar properties: Q1: monitor the amplitude of exploration; Q2: organize a cumulative process.

Analytical framework

We built our methodological framework based on the DS-VM framework to investigate these questions. To answer Q1 and qualify and track the explorations, we analyzed the device's input, outputs, and role in bringing innovation at the DS level. To answer Q2 and qualify accumulation and convergence, we tracked the structure of the knowledge and the assessments made by the practitioners at the VM level. This work was facilitated by a new way of producing the data by directly tracing all numerical data generated by the CAD tools themselves.

Data collection

We decided to conduct two case studies (Yin, 2002). We found highly relevant cases according to the aforementioned research gap and research questions. The cases we chose both exhibit high and adequate levels of innovation and they generated a considerable amount of observable and unambiguous data because they mobilized an intensive use of CAD tools. Thus, their outcomes were easy to track. These data can be used to describe the entire design process in detail (the status of the concept, the exchanges between designers, and the mathematics describing the concept) and were completed with several interviews with designers. Each time, innovation was assessed

with the interviews and collected materials. To clarify the type of tools that have been used and the type of data they produced, we provide a small explanation of their operating conditions here. Three types of CAD tools were mobilized for the two processes:

-3D modeling

These tools are used for the geometric modeling of an under-designed object. The designers typically design each individual part with the required level of precision before assembling all the parts, thus creating a full digital mockup of the soon-to-be product.

-3D simulation

These tools are complementary to the above modeling tools. They are used to assess the geometrical properties of the 3D parts and assemblies, such as surface quality or resistance. They can also simulate ergonomics and almost every flux, such as thermal or magnetic.

-3D development environment

These tools are mostly used by the video game industry and for testing interactions. They consist of a set of building blocks or editing code lines, which set behaviors to virtual objects, such as 3D models or visualization options.

CAD tools are a new and powerful way of collecting data about the design process. They generate data and clarify the rules and mathematics of rules around which the designer designs and communicates. Unlike interviews, these data are not prone to subjectivity. They require a small amount of interpretation and deciphering, but they comprise very detailed and rich research material.

We also investigated physical mock-ups, which were of great use for simulating ergonomic constraints, particularly in the first case study.

To track the design process, we used three key features in each case and cast light upon their interactions. A strong focus was directed toward the starting constraints given to the designers and their degree of explicitness. The device, namely, the different CAD tools used by the designers that generated the data, was also within the scope of our tracking process. Finally, the different results of the project are listed and expressed in terms of innovation and how we can characterize it.

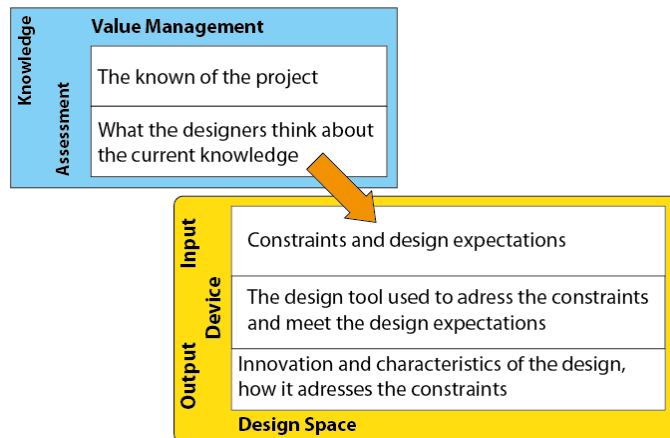


Figure 3: How the VM and DS layers were filled

Choosing the cases

The two processes exhibit dissimilar structures: the first is close to a standard NPD over a constrained process, and the second is an exploratory unconstrained process. The first case is similar to the modular model but proposes intensive architecture revision. The case is an especially sequenced project with identified design spaces and steps. The constraints were very clear and explicit. The designers faced difficult constraints but managed to be very creative and original, obtaining unexpectedly good results. In a sense, this process was similar to a frontloading process (Thomke, 2000) distributed over the entire design process. The capacity of the tool to play with the right constraints was the key in this case and was successfully exploited by the designer during two critical steps of the design process. What could have been poor in terms of innovation due to the number of constraints, turned out to be both a success and an innovation due to the nature of the tools used.

The second case is quite similar to the concept shift model but included an accumulation of knowledge and a form of convergence. The case was highly exploratory and its success came from unexpected directions. The starting brief was very optimistic and was linked to difficult constraints, but there were no tools suitable for handling them. Two designers, frustrated by the project's lack of progress and its probable imminent failure, reinterpreted some non-priority constraints by choosing the one most adapted to their favorite tools. In both cases, the designers were able to achieve innovation and success by working off the grid. This convergence was well controlled, and a new architecture was proposed for the initial project, stressing the cumulative capacity of the tools.

Case	CAD tool used	Interviews	Data analyzed	Case features
Nooméo '3D Scanning device'	3D modeling 3D simulation 3D vizualisation	5	CAD models (> 250) Physical Mock-ups Presentations	Close to modular <i>but</i> with architecture revision
Beauty Company 'Makeup cabin'	3D modeling 3D simulation 3D dev. environment 3D vizualisation	2	CAD models (> 400) Software prototypes Patents	Close to concept shift <i>but</i> with accumulation

Table 2: Cases summarized

CASE STUDY

Case 1:

We investigated a project for the design of a new portative 3D scanner. The scanner is a highly technical object, but ergonomics and usage also played crucial roles. At the beginning of the project, the directors of a startup called Nooméo had made very powerful algorithms able to transform images and position data into usable 3D information through signal analysis, i.e., they were able to generate highly precise and sharp dot clouds and then mesh them to form 3D objects. To create the best 3D scanner possible, they found the hardware material able to feed their algorithm with the greatest efficiency, making compromises among a reasonable calculation time, resolution, and cost. They picked up the components and assembled them inside a plastic body. At a conference, a famous industrial designer and head of the design studio at Dassault systems encountered the team and proposed collaboration between them and the design studio. The aim was to both propose a better product with a “sexier look” (revamping) and to have a good story to tell to illustrate the capacities of the in-house Dassault Systems software CATIA for design and collaboration. The constraints were strong and direct at the beginning of the project. The industrial designers of the team had to propose a new product while maintaining exactly the same technical parts and means of producing the outer case, i.e., plastic injection. This is the case in which almost all the design has been completed, there are little to no degrees of liberty left, and all that is expected from the designer is to make the product “look good”.

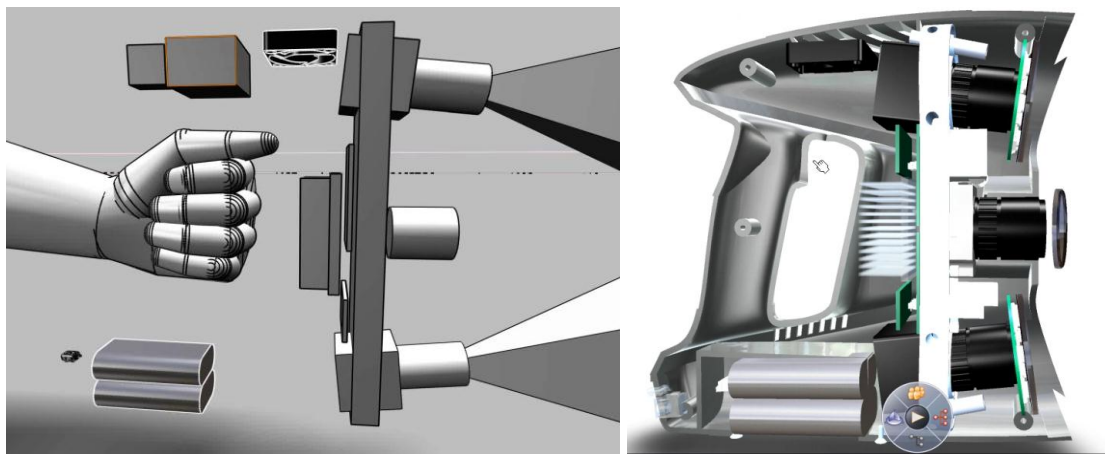
The project appears as “over-constrained” and actually impossible to achieve! The breakthrough here relies precisely in the capacity to combine apparently contradictory requirements. At the beginning of the project, the following technical and functional constraints were identified and transmitted to the design team:

- 1- Constraint 1: Global operating technical conditions. The product was supposed to be as light as possible, have good ergonomic features, and be able to emit the internally produced heat.
- 2- Constraint 2: Ready-made technical parts, such as inertial sensors, cameras, a fan, a battery, electronic cards, and a processor. As previously explained, the technical parts were already known when the project began, and no

modifications were possible. They had a given size, weight, and operating conditions.

- 3- Constraint 3: A specific manufacturing method. The plastic case of the product was supposed to be made from two symmetrical molds with a middle joint plan. The technique was to be plastic injection molding. The shape of the plastic case was also very important because it was the conveyor of the dissipated heat.

The constraints were precisely identified, and direct mapping was possible with the tool because it precisely matched some steps of the Stage-Gate process. For both constraints, the industrial designers, Nooméo, and engineers used the CAD software CATIA. This software allows for the management of the entire design process by offering specialized tools adapted to the specific design steps and professions. At first, it had been used to quickly evaluate the ergonomics and technical consequences of different respective configurations of the technical parts. With direct and intuitive manipulations, quick iterations were possible, and Nooméo and the engineers validated one of the architecture models proposed by the industrial designers in less than two weeks. In this first step: knowledge on potentially contradictory requirements was used to identify the key challenge of the product architecture; a design space is set up to be able to create multiple alternative product architectures, some of them leading to breakthrough in term of combination of technical capacity, user-friendliness and low cost level.



Picture 1: Architecture and outer case design and evaluation

Once the architecture was validated with CATIA, the tool was used for a dynamic update of the different parts (e.g., foam addition, modification of the thickness). The tool allows industrial designers to work on the shape of the object and thus directly interact with its final appearance while also being able to control and assess the technical implementations. The software also guaranteed the designed plastic case could be manufactured with the chosen technique (in this case, plastic injection). The main constraint was the conformity of the modeled case with the clearance angle of the molding process and the optimization of its thickness according to the global/local thickness and weight. Throughout the process, it was possible to simulate the position of the future user's hand and thus optimize ergonomics (position

of the center of gravity and minimization of the cantilever). The software also optimized the different airflows for the hot air exhaust grids relative to the chosen styles. At one step, there was a drastic revision of one of the important elements inside the case, and shock-damping foam was added to the optics-supported frame, increasing its size. The parameterized outer shape was automatically regenerated due to specific capacities of the software.

In the end the project was a breakthrough by its capacity to combine high user-friendliness, technological breakthrough and cost efficiency: the product's style is highly original compared with its competitors due to its novel architecture. The product's fluid lines and style were inspired by motorbikes, and yet it is comfortable to hold and provides a firm grip. The senior designers deemed the product "beautiful and original". Cost efficiency and technical capability were very high by reusing available components and technologies. It has encountered great commercial success and is sold as part of a larger solution.

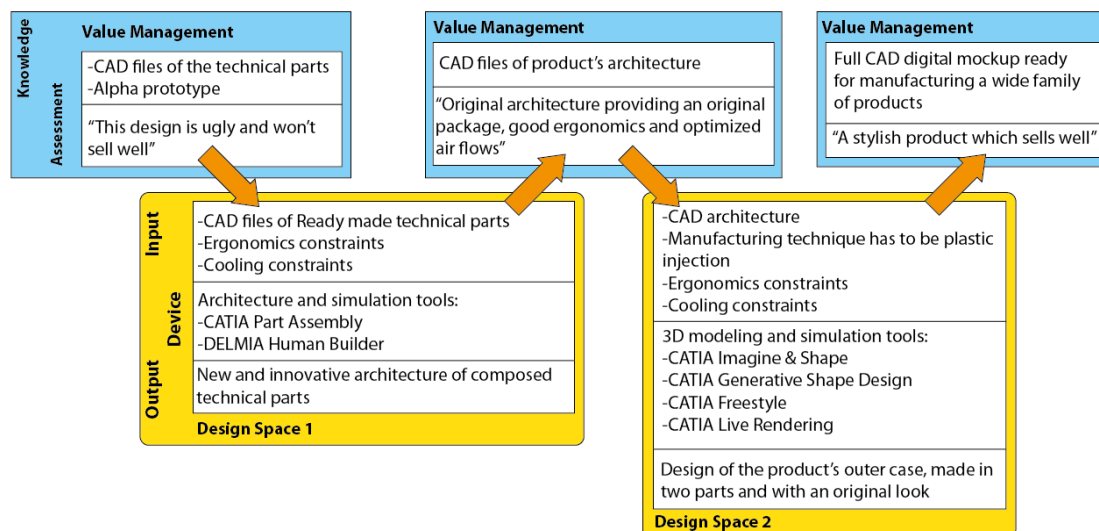


Figure 4: DSVM model for the first case study

Synthesis

In this case, Q1-a (the monitoring of the breakthrough without relying on a stable architecture) has been achieved by conducting the process in two identified steps. A sharp identification of the constraints led to designate two sequential design spaces to be able to deal efficiently with them, namely, the architecture and modeling of the outer case in a first step and the plastic case and the foam in the second step. Actually the constraints are taken as an opportunity to generate breakthrough architectural alternatives. They are "generative constraints". For Q2-a (cumulative convergence without relying on a stable product architecture), the convergence result was not on a single object, in contrast to what the pictures tend to show. Instead, the result was a *very rich and structured set of parameterized rules, that we can call an algebra of rules*. This algebra can then almost automatically give birth to several objects. Each combination of these rules can give birth to an entirely different result that is still compatible with the initial brief. This algebra of rules enables the

generation of an infinite amount of scanners, all of which integrate the same successful breakthrough. The shock-damping foam is a perfect example of this process: it required a revision of the outer case but without shifting the concept. In fact, the final product, which could be mistaken for the result of the project, is only one of the multiple possible embodiments of the calculation of rules generated.

The process was tightly constrained and organized systematically. It appears very similar to a “modular design process” in the sense that there are many known constraints at the beginning but, contrary to the usual modular process, the architecture is not stable. On the contrary the exploration precisely focuses on architectural alternatives. This example hence shows that stable architecture is not necessary for a radical innovation process – what is necessary might rather be (Q1) the capacity to identify generative constraints and to be able to deal with the constraints in a creative way; and (Q2) the capacity to integrate the acquired knowledge into a structured set of rules.

Let’s analyze now case 2, to see whether we find similar features, despite strong initial conditions.

Case 2:

Our second case study is a project that started during a CEO meeting between a high executive of Dassault Systèmes and another high-level manager from a famous French beauty product company we will not cite for confidentiality reasons. The organization will be called “the client” from now on. The project was ill-defined and was at first quite evasive and stressful in terms of technical requirements and functionalities, with very high or impossible expectations. The project was initiated as a distant vision and had no established business plan. It resembled a brand demonstrator. The process had considerable ramifications, and some steps were performed under non-official status. The project aimed to demonstrate the client’s beauty experience through a high-tech makeup cabin. The experience cabin was supposed to be designed and then prototyped for demonstration of the savoir faire and qualities of the brand. The cabin requirements were to propose a full beauty experience to the customer. The client was supposed to enter inside the cabin. Her face would be 3D scanned instantly and then displayed on a screen/mirror. An analysis without touching her skin, a premiere, would be then performed. Using light sensors, the image would simultaneously analyze several parameters of her skin, such as the dryness, sensitivity, pigmentation, and wrinkled/tight scale. Then she would receive beauty recommendations based on the brand’s products. Advice would also be given about how to use and apply the products on her skin. A real-time interactive preview of the final result would also be available. Several different organizations worked on the project: the client and contractor, the design studio, a prototypist, and a subcontractor. This original project had the following two constraints:

- 1- Constraint 1: High requirements for hardware and software capacities (beyond the reach of current technologies) were implied for the realization of such a complex system: scanning, diagnostics, display, interface, real time, and photo realistic.

- 2- Constraint 2: The client formulated a very specific and highly constrained use for the customer. The customer was supposed to have time and be happy with the result, with a nice memory of the experience and obtaining positive feedback about the brand. This use was not a resource for the design team and was completely implicit. The designers did not have the chance to explore this constraint.

A range of technical parts and very specific software capable of unreachable performances had to be designed to meet these constraints. The technical challenges were so high that technical modules were proposed but were not able to satisfy the required technical needs for the specific use case. In the end, the CAD software was only used to design the physical cabin without the technical parts, i.e., only the walls, mirrors, and light positioning. The dispositive was able to address only a very small portion of the constraints. This inadequacy comes from two sides: the constraints were not sufficiently exposed to the designers, so they could answer them in a dedicated environment. Some constraints, such as the use case, were not considered as such and could not be addressed in detail with the software.

This first project saw limited success, with minimal or no innovation. The final result was a modified use case, where the customer would enter the experience cabin and receive makeup and counsel by a professional. The entire experience was recorded, and the customer could capitalize on the experience by taking home a personal DVD. In the end, however, this collaborative project had some unexpected side effects and results that are addressed below. Due to the motivation and creativity of two designers, two under-the-radar projects were conducted. The two designers, experts in their domain, were able to use their expertise to redesign some key steps of the initial project by identifying critical constraints and using the more adequate workshops they found related to their own specific competencies. The results were astonishing, as they both developed highly innovative specifications.

This first sub-project had the main objective of proposing a replacement process for the design of new makeup. Traditionally, new makeup is created with a paper process in which “styles” are defined and different materials (which can be, for instance, powders or milks) are applied and tested to define a new range of corresponding makeup. The goal was to replace this process with a digital one. Instead of creating a style silhouette on paper, the makeup designer would use a real-time animated female 3D head on which he would apply digital makeup for visual assessment. At first, there was a capture step, which consisted of acquiring the visualization data of a given material. The process captured such properties as transparencies, reflections, and colors. Then the designer was able to redesign the digital material inside the software, which mimics the properties of the original material in a virtual environment. These materials possess a large range of properties, such as transparencies, diffusion, reflections, and color information. Measuring these properties in real life and providing high-fidelity virtual correspondence is challenging. The technical constraints were numerous, and some of them were

answered by external service providers, such as for the model of the human head. The designer addressed the following constraint:

- 3- Constraint 3: Real-time implementation of makeup with photorealistic rendering. The assessment was made by the subjective perspective of a highly competent makeup professional (client style director).

This constraint implied a process for capturing the visual properties of the makeup and displaying them at will on a virtual head. This type of software is called a “sand box” and enables rapid and user-friendly interactions. A user can generate, edit, and interact with content of any type in 2D and 3D. Due to the very high plasticity of the software, the designer was able to test and validate a new process for creating materials inside a CAD tool. This method is now patent pending and will be used with the future tools of Dassault Systèmes. A user will be able to simply import and modify the properties of the materials being used inside the virtual world with intuitive and direct interactions fitted to his or her knowledge and expertise and depending on whether he or she is an engineer or industrial designer. The tool for recreating the materials should also be a good support for designing new materials or fine-tuning existing materials. The designer, due to the interactive environment, was able to test and evaluate new implementation methods under the shape of a dedicated modular architecture. This capacity was a great achievement of the project and is now being implemented as the reference tool and method for creating materials in the company leader CAD software.

Another sub-project was conducted by one of the industrial designers on the side of the official project. Whereas the efforts were focused on answering nearly impossible technical constraints, he identified the makeup action as an act of tremendous importance. In fact, applying makeup is difficult and requires special skills and use of specific tools. For instance, different pencils are used with different profiles for nail painting (sometimes up to three pencils for a specific work) with functional differences: a large pencil for quickly covering large areas and a thin pencil for detail. The designer had the idea of proposing an all-in-one pencil able to modify its profile at will to fit all the different steps of applying makeup. The given constraint is related to the makeup application process, which is complex and implies numerous different tools, occasionally of the same type, such as pencils.

The designer was able to design and assess the properties of a physical product able to operate as he had in mind: a single pencil able to modify its profile at will to fit the needs of the user. The software allowed for the rapid assessment of technical solutions and the production of a reference 3D model, which was used to create an operational prototype. This new type of profile changing pencil was patented (WO2009063305-A1).



Picture 2: The patented polyshape pencil

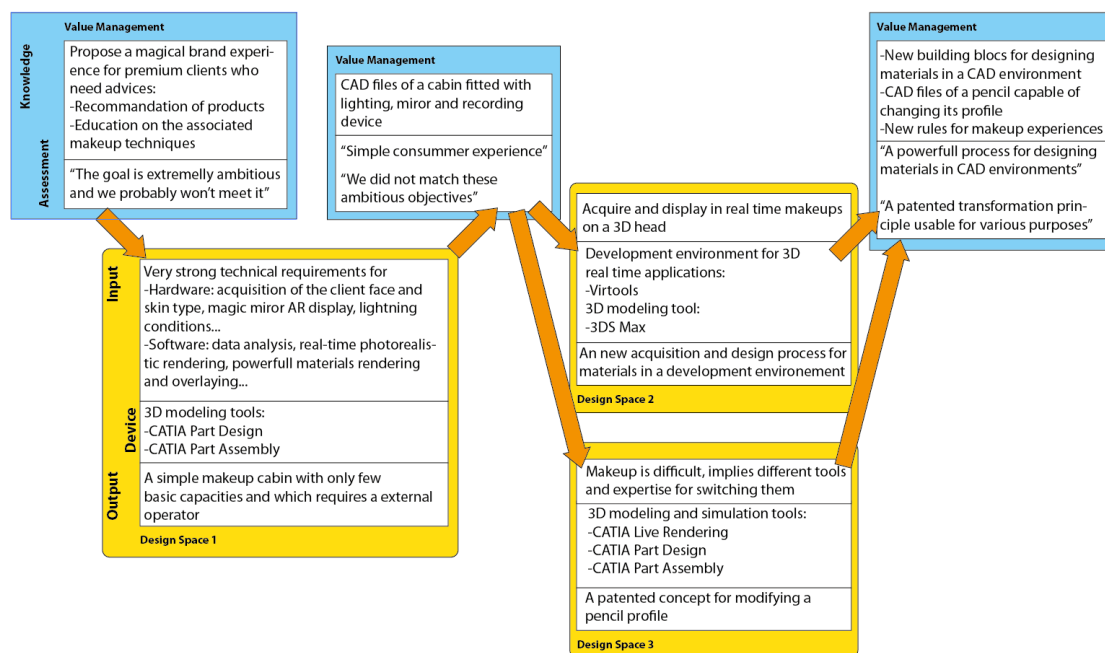


Figure 5: DSVM model for the second case study

This case study illustrates that design tools play a crucial role even in very explorative, ill-defined processes. The tools allows for integrated innovations. This success relies in large part on the possibility of the industrial designers to access and work on the constraints with the dedicated tools. The project is more likely to fail when this relationship is not possible. With its capacity to address many different issues inside a similar environment, build various designs, and address numerous professions, the CAD tool CATIA appears ideal to answer this challenge of linking constraints and specific design spaces. The process is very exploratory and similar to a concept shift, but we also identified a modularity approach embedded and hidden within this process.

Synthesis

At the first step, this case appears as a counter-example because neither a breakthrough nor monitoring was achieved. Indeed, the constraint was poorly designated (especially that related to the makeup use), and the associated DS was

poorly identified. The result was disappointing in terms of breakthrough, but it did provoke a socialization of the issues because two designers, using their own personal initiative and the knowledge gained in this first, unsuccessful trial, identified sub-constraints and how they could deal with them in specific Design Spaces.

Regarding Q1-a (monitor exploration without relying on leadership and team members), the monitoring on the constraint in each sub-case was associated with a device for breakthrough: the two specific CAD tools. The identification of the constraints and the appropriate DS to address these constraints finally lead to breakthroughs. Once again we see a clear logic of “generative constraint”. Related to Q2-a (cumulative convergence without relying on leadership and team members), what is important for accessing radical breakthrough innovation is not the unique solution: just like in case 1, the main result is the structured set of rules for the generation of new makeup tools and the generation of an infinite amount of textures. Here again the cumulative convergence takes the form of an “algebra of design rules”, i.e. a set of rules that can be combined (to design multiple products).

Finally this second case enriches the concept shift approach: there are clear concept shifts) and the team member initiative is clearly a key resource to support this shift. Still it also appears that the success is also linked to a clear capacity to identify and handle “generative constraints” (Q1) and to accumulate the acquired knowledge into a structured set of rules (Q2).

RESULTS, DISCUSSION AND MANAGERIAL IMPLICATIONS

We had shown that contemporary approaches to radical innovation processes finally had in common to try to monitor exploration and to organize a cumulative convergence. But we also noticed that they tend to rely either on a stable product architecture (hence restricting exploration) or on leaders and team members. We use two case studies to discuss these restrictive hypotheses and to generalize two critical properties of radical innovation processes: R1 (for Q1): monitoring exploration actually relies on identifying and dealing creatively with “generative constraints”; R2 (for Q2): cumulative convergence can not be understood at the product level but occurs as the constant evolution of a structured and coherent set of rules, an algebra of design rules that can be combined to form multiple products. Let’s present these results in more details.

Regarding the first research question, in both cases the exploration depends on two conditions: 1) clear identification of critical constraints and 2) these constraints were associated with the appropriate device (architecture and design CAD tools) for a deep exploration of possible, related breakthroughs. It is critical *to link the constraints and the device to deal with them*. The designer, being able to explore the space of alternatives to address the constraints, can finally design appropriate *and* original features. This device transforms the constraints into “*generative constraints*”. This logic of “generative constraint” is widely known and used by artists. It is actually also well-known in contemporary engineering design methods like parameter analysis {Kroll, 2013 #2731}. In our study it appears as a key feature of the management of radical innovation process. Interestingly enough, dealing with generative constraints

leads to original design and since this original design helps to address critical constraints, one is led to assume that *originality is “acquired”* for the rest of the process. We define “acquired originality” as a property that has been designed with the quality of being simultaneously original and satisfying a specific constraint.

Result 1: In radical innovation process, exploration can be monitored by identifying critical constraints and handling them in a specific design space (i.e. with the right design devices) to explore the most original alternative ways to deal with these specific constraints. **To monitor exploration, it is necessary to deal with generative constraints.**

Some comments: this result is true for a modular design process, where a stable architecture help at the same time to identify specific constraints and to deal with them. It is also true for concept shift where the initial concepts or the talent of leaders or team members precisely consist in identifying and dealing with the constraints.

Interestingly enough the two aspects “constraint identification and constraint handling” can not be separated: identification alone is not enough, one also needs the tools to deal with the constraints; conversely being able to deal with certain specific constraints is not enough since the critical constraints could require new design tools to be dealt with.

Regarding the second research question: in both cases and in the two models, the cumulative convergence was *not* associated to one specific product. The product(s) actually appear as the artifactual result of the combination of design rules. And the cumulative convergence precisely appears at the level of the set of rules. At the beginning of the processes, the set of rules is either full of contradictions (see case 1) or incomplete; in both situations it is full of unknown. The cumulative process consists in transforming the unknown (ignorance or apparent contradictions) into a set of known (coherent, structured, combinable) design rules. We call this structured set of design rules an algebra, in the sense that the rules can be combined just like elements of a mathematical algebra can be combined by addition or multiplication. For instance this algebra of rules defines how different components are spatially positioned and defines the links between them. This algebra also defines every parameter of the individual parts and can be bound with other parts and mapped to an infinite number of solutions that all come from different parameterizations of the same algebra. For instance, in case 1, adding a part inside the casing requires a modification of the case part. However, a curve can be parameterized by defining the casing attached to what is inside it. If the interior is modified, the curve is automatically edited accordingly and thus generates a new casing. The sum of all elements and the set of rules is the new output of the design process. Instead of designing a single product, the designers with CAD tools can generate the building instructions compatible with the generation of an infinite number of parameterized products. This logic of an algebra of rules is well-known in engineering design; but engineering design tends to consider that the set of rules is given and stabilized at the beginning and the development process consists in using the stabilized set. We

understand here that the radical innovation process actually prepares a renewed set of rules to be used by improvement and optimization development processes.

Result 2: In radical innovation process, the cumulative convergence occurs at the level of the set of rules, which tend to become a structured set of combinable design rules, or an algebra of design rules.

Some comments: this result is true for a modular design process, where the algebra is mainly structured by the product architecture. A stable architecture help at the same time to identify specific constraints and to deal with them. It can also be true for concept shift where the leaders or team members infer the set of design rules from the set of concepts. But the logic of algebra of rules also helps to analyze the quality of the cumulative convergence: if there is no algebra and coherence between the concepts resulting from a concept shift process, then this process might not be converging.

Implications for the design of new design tools: we have underlined that identification and handle of constraints were inseparable. Since radical innovation processes might lead to work on unexpected constraints, new CAD tools might be necessary to deal efficiently with radical innovation processes. This can mean either a wider library of CAD tools or a radically new type of configurable CAD tools where designers might be able to design their own CAD workshop to deal with ad'hoc generative constraints. Regarding the cumulative set of design rules, our result also leads to predict the emergence of new CAD integration systems that will be able to handle heterogeneous types of data to check the consistency of the set of design rules.

Implications for industrial designers. It was often thought that industrial designers should intervene either very early on (to increase initial originality) or in the late stages of the design process to improve aesthetics. Our research suggests that, when provided with the right tools, industrial designers are particularly able to creatively deal with generative constraints. Hence they can support radical innovation processes, even in over-constrained environments.

Conclusion: we have identified two critical issues for managing radical innovation process – generative constraints and algebra of design rules. We have seen that these notions are in clear coherence with the usual approaches of industrial design or engineering design. This leads us to suggest a further research question: radical innovation processes should be considered as innovative design processes.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank all the participants and designers from Dassault Systèmes and Nooméo for their consideration, their efforts and their willingness to explain their data and answer the multiple questions asked during the interviews.

BIBLIOGRAPHY

- Arrighi, P, Le Masson, P & Weil, B. Breaking the dilemma between robustness and generativeness ; an experimental assessment of a new software design suite IPDM Conference Paper (2012).
- Boeddrich, H. J. (2004). Ideas in the workplace: a new approach towards organizing the fuzzy front end of the innovation process. *Creativity and innovation management*, 13(4), 274-285.
- Cheng, Y. T., & Van de Ven, A. H. (1996). Learning the innovation journey: order out of chaos?. *Organization Science*, 7(6), 593-614.
- Christiansen, J. K., & Varnes, C. J. (2009). Formal Rules in Product Development: Sensemaking of Structured Approaches. *Journal of Product Innovation Management*, 26(5), 502-519.
- Clark, K. B., & Fujimoto, T. (1991). *Product development performance: Strategy, organization, and management in the world auto industry*. Harvard Business Press.
- Clarkson, J., & Eckert, C. (Eds.). (2005). *Design process improvement: a review of current practice*. Springer.
- Cooper, R. G. (1994). Perspective third-generation new product processes. *Journal of Product Innovation and Management*
- Garud, Raghu, and Arun Kumaraswamy. "Changing competitive dynamics in network industries: An exploration of Sun Microsystems' open systems strategy." *Strategic Management Journal* 14.5 (1993): 351-369.
- Gemünden, H. G., Salomo, S., & Hölzle, K. (2007). Role models for radical innovations in times of open innovation. *Creativity and Innovation Management*, 16(4), 408-421.
- Harmancioglu, N., McNally, R. C., Calantone, R. J., & Durmusoglu, S. S. (2007). Your new product development (NPD) is only as good as your process: an exploratory analysis of new NPD process design and implementation. *R&D Management*, 37(5), 399-424.
- Hatchuel, A., Le Masson, P., & Weil, B. (2005). The Development of Science-Based Products: Managing by Design Spaces. *Creativity and innovation management*, 14(4), 345-354.
- Kleinschmidt, E. J., & Cooper, R. G. (1991). The impact of product innovativeness on performance. *Journal of product innovation management*, 8(4), 240-251.
- Khurana, A., & Rosenthal, S. R. (1997). Integrating the fuzzy front end of new product development. *Sloan management review*, 38(2), 103-120.
- Smith, Steven M., Thomas B. Ward, and Jay S. Schumacher. "Constraining effects of examples in a creative generation task." *Memory & Cognition* 21.6 (1993): 837-845.
- MacCormack, Alan, Roberto Verganti, and Marco Iansiti. "Developing products on "Internet time": The anatomy of a flexible development process." *Management science* 47.1 (2001): 133-150.

- McDermott, C. M., & O'Connor, G. C. (2002). Managing radical innovation: an overview of emergent strategy issues. *Journal of product innovation management*, 19(6), 424-438.
- Ozer, M. (2007). Reducing the demand uncertainties at the fuzzy-front-end of developing new online services. *Research Policy*, 36(9), 1372-1387.
- Richtnér, A., & Åhlström, P. (2010). Organizational slack and knowledge creation in product development projects: The role of project deliverables. *Creativity and Innovation Management*, 19(4), 428-437.
- Sanchez, Ron. "Strategic flexibility in product competition." *Strategic Management Journal* 16.S1 (1995): 135-159.
- Sanchez, R., & Mahoney, J. (1996). Modularity, flexibility, and knowledge management in product and organization design. *Strategic management journal*, 17(WINTER), 63-76.
- Seidel, V. P. (2007). Concept shifting and the radical product development process. *Journal of Product Innovation Management*, 24(6), 522-533.
- Thomke, S., & Fujimoto, T. (2000). The Effect of "Front-Loading" Problem-Solving on Product Development Performance. *Journal of product innovation management*, 17(2), 128-142.
- Ulrich, K. T., Eppinger, S. D., & Goyal, A. (2011). *Product design and development* (Vol. 2). McGraw-Hill.
- Utterback, J. M., & Abernathy, W. J. (1975). A dynamic model of process and product innovation. *Omega*, 3(6), 639-656.
- Van de Ven, A. H., Polley, D. E., Garud, R., & Venkataraman, S. (1999). *The innovation journey*. New York: Oxford University Press.
- Verganti, R. (2008). Design, Meanings, and Radical Innovation: A Metamodel and a Research Agenda. *Journal of product innovation management*, 25(5), 436-456.
- Veryzer, R. W. (1998). Discontinuous innovation and the new product development process. *Journal of product innovation management*, 15(4), 304-321.
- Yin, Robert K. *Case study research: Design and methods*. Vol. 5. SAGE Publications, Incorporated, 2002.

Cinquième partie

Les raisonnements de conception des designers industriels : des modèles conceptuels pour atteindre la singularité de masse

Chapitre 1

Contexte de l'article «Towards a theory for managing creative industrial CAD tools : dealing with mass singularity and the design of conceptual models» par rapport à la thèse

Le modèle stratifié identifie les propriétés des ateliers requises pour les designers industriels. Plus particulièrement, le modèle stratifié met en évidence l'importance du modelleur géométrique dans les ateliers ainsi que des séquences de perception et actions autorisées. Les modelleurs géométriques sont directement liés au type de données que le logiciel manipule, ce qu'il conçoit ainsi que ses interfaces spécifiques. Il s'agit d'une approche «microscopique» du processus comme illustré en Figure 1.1. Nous étudions le fonctionnement précis et détaillé des mécanismes à l'œuvre au sein d'un atelier particulier, notamment les modes de raisonnement qu'il permet, le type de représentation qu'il manipule et les interfaces qu'il propose.

Rappelons ici la troisième hypothèse du modèle séquentiel :

Hypothèse 3 : La logique d'accumulation durant la conception est une logique

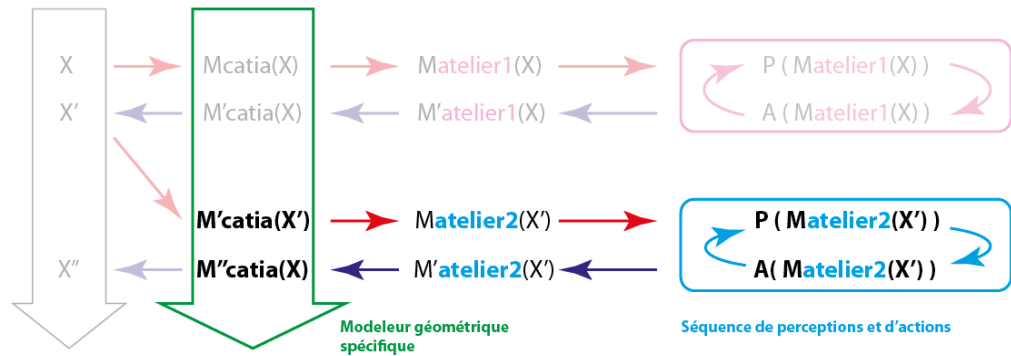


FIGURE 1.1 – Le modèle stratifié met en évidence l’importance du processus d’accumulation permis par les spécificités du modeleur géométrique de la suite logicielle et des capacités d’interaction au sein de l’atelier. Approche «Microscopique».

de sélection lors de laquelle des paramètres sont successivement instanciés. Au sein de cette logique, se succèdent accumulation, sélection et validation.

Notre modèle stratifié permet une reformulation de cette hypothèse 3 qui devient :

Hypothèse 3’ : La logique d’accumulation est une logique d’enrichissement de la base de règles permettant d’instancier des familles de produits. Elle rend possible une logique dans laquelle des paramètres ne sont pas forcément successivement instanciés.

Chapitre 2

Résumé de l'article «Towards a theory for managing creative industrial CAD tools : dealing with mass singularity and the design of conceptual models»

2.1 Problématique et enjeux

Il existe une incompréhension des mécanismes profonds de fonctionnement des logiciels de CAO. Alors qu'ils semblent concevoir des objets similaires (des modèles 3D affichés sur un écran), la nature même des objets ainsi que des professionnels qui les mobilisent diffèrent radicalement. Il est nécessaire de d'abord comprendre quelles ont été leurs évolutions respectives. Une telle analyse montrera alors pourquoi les designers industriels ont longtemps été dépourvus d'outils intégrateurs personnalisés. En effet, en dépit de décennies d'efforts, ces derniers ne disposent toujours pas des outils adaptés à leur usage. Il est possible que les tentatives n'aient été pour le moment que principalement axées sur des dimensions techniques et qu'il faille développer un nouveau modèle des raisonnements pour pouvoir parvenir à adresser ces besoins. Ainsi, quels doivent être les raisonnements de conception des ateliers de conception pour les designers industriels créatifs, et par extension, les concepteurs créatifs ?

2.2 Méthodologie implémentée

Pour répondre à ces questions, nous nous concentrons sur l'hypothèse 3' rappelée ci-dessus. En effet, chaque atelier est en mesure d'anticiper des contraintes habituellement traitées ultérieurement et par là même de proposer de la créativité à la demande orientée sur la contrainte cible. Nous caractériserons les propriétés nécessaires des outils permettant d'obtenir une telle performance. Ces outils doivent également correspondre, par les modes de raisonnement qu'ils permettent, d'adresser les besoins des designers industriels créatifs. La compréhension de ces raisonnements avec d'autres professionnels avec lesquels ils doivent collaborer dont les outils sont des références sera également précieuse.

2.3 Résultats principaux

2.3.1 Résultats académiques

Plus exactement, nous commençons par effectuer une analyse historique détaillée clarifiant quelles sont les différentes classes d'outils déjà créées et les besoins de conception associés. Ce travail est réalisé pour les logiciels des ingénieurs, des artistes 3D et des designers industriels. Nous constatons alors que chaque évolution des outils est liée à des fonctionnalités spécifiques requises par les concepteurs et adaptées aux produits qu'ils conçoivent. Les ateliers et outils numériques de conception ont évolué ainsi en suivant précisément les besoins exprimés par les professions qui les utilisaient. Dans le domaine de la modélisation 3D, capacité phare des outils de CAO industriels, il est possible d'identifier trois classes d'outils correspondant aux professions d'ingénieurs, d'artistes 3D et de designers industriels. Cependant, ces derniers sont relativement mal lotis comparés à leurs collègues concepteurs.

Suite à cela, nous analysons les propriétés de trois outils de CAO, parmi les plus usités et performants, et vérifions qu'ils suivent bien la tendance historique. Afin de mieux les différencier, de dépasser la fixation des professions qui les utilisent (ingénieurs, artistes 3D et designers industriels) et de surmonter les représentations affichées sur les écrans de leurs ordinateurs, nous étudions précisément les modes de raisonnement que ces outils mobilisent et les caractérisons. Une telle analyse est appliquée à chaque outil afin d'établir un cahier des charges de conception correspondant systématiquement à un même type d'objet. Les conclusions de cette analyse sont utilisées dans cette partie sous une forme synthétique. La version complète de cette étude est disponible dans l'article disponible en annexe, intitulé «Requirements for effective industrial design software : retracing historical evolution of CAD tools for enabling better design integration» ([3]). Précisons que cet article est présenté en partie VII.

Plus spécifiquement, nous montrons que la difficulté principale réside en la compréhension fine des raisonnements des concepteurs respectivement intégrés alors que la littérature se focalise essentiellement sur les optimisations d’interfaces et modeleurs géométriques de ces outils. En effet, les objets que les concepteurs manipulent sont similaires et il semble que les interfaces ainsi que les modeleurs partagent de plus en plus de propriétés communes. Nous montrons que les ingénieurs conçoivent en réalité des algèbres de règles à paramètres imposés qui conçoivent des produits par des processus de type généralité de masse. Les artistes 3D, quant à eux, conçoivent des listes spécialisées de paramètres fixés pour générer un produit unique à la singularité maximale.

Les designers industriels sont en revanche contraints d’explorer des listes denses et singulières de paramètres avant de les projeter dans un ensemble réduit de paramètres qu’ils devront eux-mêmes identifier. Nous appelons ce processus singularité de masse. Ces outils et ces suites pour designers créatifs augmentent fondamentalement la capacité à traiter les contraintes dans un mode génératif, tout en conjuguant la singularité de l’exploration associée à un effort de mise en règles assurant l’intégration de ces explorations avec la suite du processus. Nous montrons que cette aptitude spécifique de création de modèles originaux constitue un type de logiciel spécifique, visant à obtenir la génération de modèles conceptuels. L’intérêt de ce travail réside donc à la fois sur la proposition de famille d’outils inédits et sur une meilleure compréhension des logiques d’intégration du designer créatif au sein de processus de conception.

2.3.2 Résultats industriels

De par nos constatations, nous avons proposé un atelier de conception immersif au sein duquel les concepteurs peuvent manipuler et importer du contenu préalablement modélisé par des gestuelles et des interactions. La découvrabilité ainsi que l’ergonomie de ces interactions ont été bien évidemment optimisées. Ce prototype fonctionnel offre des résultats intéressants concernant la mise en œuvre d’un des trois brevets et permet de caractériser le cahier des charges pour une utilisation en situation industrielle. Il est ainsi possible de créer dans cet atelier immersif des modèles conceptuels innovants, comme par exemple autour de la contrainte de gravité. Il est également adapté à la validation des résultats développés dans la partie 3 de ce manuscrit en fournissant un espace d’expérimentation pour la sélection, la recherche ainsi que la manipulation de contenu 3D en environnement immersif. Par défaut, il s’agit d’un atelier commun pouvant être utilisé pour réaliser des prescriptions croisées. Cet atelier en cours de fonctionnement est illustré par les Figures 2.1. Les Figures 2.2 et 2.3 montrent les diverses configurations possibles du contenu de l’atelier.

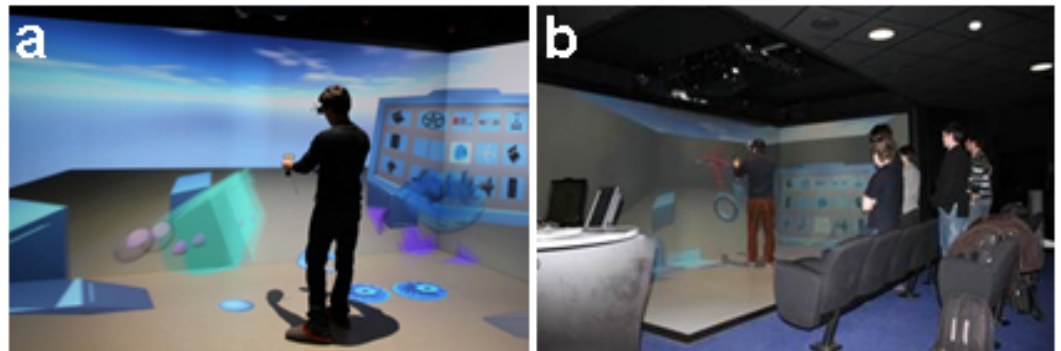


FIGURE 2.1 – L’atelier de conception immersif en situation d’usage. (a) L’utilisateur est en situation. (b) La salle de réalité virtuelle dans laquelle le prototype est testé.

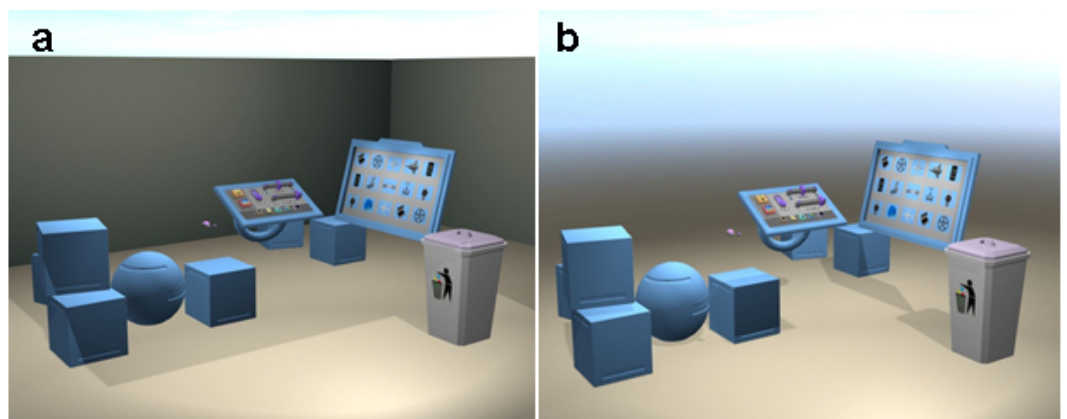


FIGURE 2.2 – L’atelier de conception immersif permet de tester des ambiances variées. (a) Environnement ouvert. (b) Environnement fermé.

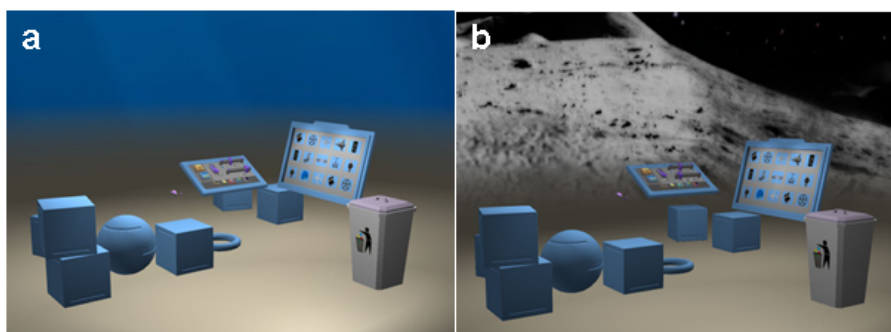


FIGURE 2.3 – L’atelier de conception immersif permet de tester des ambiances variées en faisant varier gravité, interactions entre objets ou encore éclairages. (a) Environnement aquatique. (b) Environnement lunaire.

Chapitre 3

Article 3 : Towards a theory for managing creative industrial CAD tools : dealing with mass singularity and the design of conceptual models

Arrighi Pierre-Antoine, Pascal Le Masson, Benoit Weil

CGS Mines ParisTech

Papier présenté au SIG 2014.

Toward a theory for managing creative industrial CAD tools: dealing with mass singularity and the design of conceptual models

Arrighi Pierre-Antoine, Pascal Le Masson, Benoit Weil
CGS Mines ParisTech 60 boulevard Saint-Michel 75272 PARIS Cedex 06

Pierre-Antoine Arrighi
pa.arrighi@gmail.com
01 61 62 63 24

Abstract

Computer-Aided Design (CAD) is largely oriented toward the technologies and algorithms for generating representations of the product under development. The literature can be classified into three categories based on the professional they tend to address: engineers, 3D artists and Industrial Designers (ID). ID tend to use tools that were not made for them and struggle to maintain their creativity and be integrated into the industrial processes. We propose a new approach based on design theories to shed light on the lack of dedicated CAD tools for ID. Our aim is to understand, model and compare the logics of each different CAD tool category. We conduct a historical analysis of the evolution of CAD tools and their best current representatives. ID require their own specialized CAD tools and cannot be satisfied with simple extensions of tools made for engineers and 3D artists.

Engineering CAD tools seek to generate the best possible algebra of rules between Functional Requirements (FR) and Design Parameters (DP) in a design process of massification and generalization.

Artistic CAD tools seek to generate the most detailed possible list of coherent FR and DP in a design process of maximal singularity. The designer aims for high congruence with the initial list and simultaneously extends it by adding a profusion of details.

ID CAD tools seek to combine the CAD tools of engineers and 3D artists plus some special features of their own. The final result is the creation of a conceptual model in a process of expansion and projection for mass singularity.

We then propose two strategies for designing CAD tools for ID, “Acquired Originality” and “Conformation and alternative generation”.

Keywords: Computer Aided Design (CAD), industrial designers, engineers, 3D artists, conceptual models.

1. Introduction: lack of a theoretical model for understanding CAD tools' reasoning

In the computer science literature on Computer-Aided Design (CAD), the focus is mostly oriented towards the technologies and algorithms for generating representations of the product under development (Stergiopoulos et al. 2003; Dyn et al. 2009; Mandil et al. 2011; Bodein et al. 2012). This literature can be easily mapped into three categories based on the professional they tend to address. On the one hand, there are the engineers; on the other hand, the 3D artists. In a kind of blurred middle ground, the profession of Industrial Designers (ID) is at the center of a great number of proposals and innovative tools. Yet, there are still debates about the inadequacy the ID face when they try to use 3D CAD tools (Tovey 2002; Dorta et al. 2008). They tend to use tools that were not made for them and struggle to maintain their creativity and to be integrated into the industrial processes. Why does the lack of CAD tools designed to address ID needs continue after more than 20 years of reporting the issue and countless proposals for addressing it?

We suggest that it could be explained by the difficulty of characterizing the difference between the reasoning modes of the respective tools. To this end, the current paper argues that we first need to offer a new perspective on these tools, by understanding the underlying reasoning they imply, to understand why and how they are specially adapted to design professions and reasoning. This paper proposes a new design-centric approach to this question. The notion of design is shared by a wide variety of professionals acting across very different industries. These professionals, who can be architects, engineers, graphic designers, ID, and 3D artists are often studied by the literature from different perspectives, such as organization sciences, design theories, computer sciences, and even epistemological sciences. This variety of academic work and studies give different feedback regarding their best practices, tools and ways of collaboration. Scholars try to characterize their specificities, how they can collaborate together and contribute to innovation and certain types of oriented designs.

Our research motivation is to characterize, understand, model and compare the logics of different CAD tools for each archetypal profession and, in particular, for the ID. We will use an analysis frame from the design theories to model the reasoning steps of designers using these tools.

We start by identifying the tendencies of the literature in dealing with such tools and how they are classified. We then formulate a generic framework for modeling the reasoning of CAD tools based on design theories. We will use our framework to review the most famous CAD tools for all three professions (engineers, 3D artists and ID) and back up our findings with a review of the historical evolution of design tools (Bozdoc 1999, 2003; Farin et al. 2002), mainly for engineering design and graphical art. In both cases, the need created by the evolution of the profession is sooner or later addressed with a technological breakthrough. We show that ID's dissatisfaction can be modeled and understood by taking a design-centric approach and can be explained from a reasoning perspective. This model can be used for a better understanding and analysis of the past and present situation regarding the CAD tools for Engineers, Artists and ID.

2. Literature review: focus on technologies and separation by professions

We start with a literature review of the current themes and subjects developed by research in computer science. This literature is usually the starting point of every software development project. Our review carries along the categories taken from the literature of the CAD tools, mainly distributed along the two following axes:

- the modeling capacities of the geometrical kernels, which define what type of objects can be created and the associated functionalities.
- the tools' interfaces.

Our method is to analyze the properties of the design tools, the professions who use them and the reasoning modes they imply. We rely on the terminology we found in the computer science literature for describing the users. We chose to make a distinction based on the criteria of the final destination of the design object and the profession that uses the tool. Three professions and their associated tools emerge with this method: (1) the engineers who work in the manufacturing industry and use CAD tools to design every industrially produced physical object; (2) the 3D artists who work in the entertainment industry and use CAD tools to design virtual environments and content, primarily for animation, movies and video games; and (3) the ID who work in the industry and concentrate on the user experience of the manufactured products.

2.1 Literature of CAD tools for engineers: the design for manufacture

The first identified category in the CAD tools literature will be called engineering CAD design tools in this paper. These tools were developed to best fit and address the needs of the engineers. The computer science literature we studied covers the development of tools and their related algorithms. We observed that the literature is oriented toward improving the geometrical model kernel and the interfaces of the tools. We can here refer to a small collection of such CAD tools: CATIA, SolidWorks, Proengineer and NX.

This family of products evolves inside a galaxy of other services such as simulation, ergonomics and rendering tools. These suites can manage the design of the product from its initial concept stage towards its market release and maintenance. They are also called Product Lifecycle Management/Product Data Management tools.

2.1.1 Geometrical model kernel of engineering CAD tools, a powerful engine for modeling the different representations of the concept

The geometrical model kernel is the engine of the CAD tool. It determines what type of objects can or cannot be modeled and managed by the software during the design process. It allows algorithms to compute and optimize designs. This category of the literature is globally evolving towards more functions and the ability to solve more problems of various natures with algorithms of increasing performance, while being able to handle new classes of objects. Data conversions are also often discussed. Some scholars such as (Mandil et al. 2011) modify the geometrical kernels to describe new attributes, such as geometrical dots and line segments to depict early design stage mechanisms. (Dyn et al. 2009) proposes to replace uniform parameter values by chordal and centripetal ones to reach non-linear schemes that are invariant under solid body and isotropic scaling transformations. He is able to obtain smooth curve limits, and the centripetal parameters prove to be valuable for highly non-uniform initial data. These two papers show the progressive implementation of capacities for the modeler to handle more types of objects (such as functional specifications depicted geometrically) and/or to depict more precisely

objects with non-uniform specificities. The functions and capacities of the software are also affected by the ability to deal with more constraints, some of them of a different and totally new type, such as user preferences. (Kelly et al. 2011) proposes in his paper a method of simultaneously optimizing both design engineering performance and the shape preference provided by customers. Because of the increasing data and knowledge generated during the design and manufacturing process, (Ouertani et al. 2011) proposes in his article a new framework for the better exploitation and curation of knowledge. This approach has also been followed by (Bodein et al. 2012). With the use of knowledge, the use of tools and certain functions can be more context oriented. A decisional model for the use of knowledge ware is proposed.

2.1.2 Interfaces for manipulating digital engineered content, towards enhanced perceptions of the product in its future environment

The interfaces enable interaction with the machines. The growing demand for experiencing the products at the early stages of design has created a strong need for new interfaces with extended sensory-motor capacities. There is a progressive shift from old interfaces such as the mouse and keyboard toward immersive ways of interacting, such as touch, multi-touch and virtual reality. Researchers such as Fuchs (Fuchs and Nashashibi 1998) work to optimize interactions between the designers and their designs. Almost 15 years ago, they foresaw the transition from mouse and keyboard to virtual reality interfaces that is happening now. This field proposes enriched interactions in both modes, from the designer to the machine with more sensors, as in (Stergiopoulos et al. 2003), but also more feedback capacities, as in the paper published by (Deschenes et al. 2004), who proposed innovative ways of perceiving digital content. We can also cite the paper (Kang et al. 2013) that focuses on the step of transferring from existing technologies to new portable devices (in this case tablets and smartphones with multi-touch). He proposes new schemes for interacting with the software based on multi-touch features. (Liu et al. 2004) proposes a system for direct interaction and modification with a haptic device for specific engineering CAD models (B-Rep).

In the articles about CAD tools for engineers, researchers seek to increase the capacities of geometrical modeling kernels to allow them to handle more functions, algorithms and properties of the underlying design concept throughout the whole design process (including the factories' design, the manufacturing and the maintenance). It is because what is designed will exist and evolve inside the physical world that so much refinement is needed, so the digital object tends to become the most perfect model of the future real product, up to the chosen tolerances. Most of the generated knowledge will be reused and evolve through a set of rules. On the other hand, the literature aims to increase the interactions between the user and its model with richer interfaces, a capacity offered by the rise of immersive technologies. These interfaces need to be related to the type of representation modeled. As the product will exist in the physical world, the interfaces are moving towards more realism and tend to mimic the properties of the physical world. There is a growing challenge of being able to manipulate more complex objects with more possible "natural" means.

2.2 Literature of CAD tools for 3D artists: design for animation and entertainment

The second identified category in the literature will be called artistic CAD design tools. These tools were developed to best fit and address the needs of 3D artists in the entertainment industry.

The 3D artists produce the 3D models needed for video games, animated films and special effects in movies, known as Computer Generated Imagery (CGI). We can here cite a small collection of such CAD tools: 3DSmax, MAYA and Zbrush. This family of products evolves within a galaxy of other services such as animation, rigging, texture mapping, unfolding and rendering. We observed that the literature on this subject again stresses two aspects, the geometrical model kernels and the interfaces for manipulating them. We will show how the focus point is similar to engineering CAD tools but is approached differently.

2.2.1 Geometrical model kernel of artistic CAD tools, a powerful engine for modeling a profusion of details, to animate a virtual object

The geometrical model kernel for this category of tools is usually designed to be able to handle the highest number of polygons, as it is the final appearance under which the object under design will be displayed. The more polygons, the greater density of details can be reached. There are several ways to create and interact with these polygons, but in most cases, the artists need tools that allow a direct manipulation of the rendering result. The most advanced technique in this domain is called Pixol. The “What you see is what you get” concept is very important for 3D artists. This concept explains the past, current and future development of this category of tools. New models are introduced to address specific needs of the entertainment industry, such as video games, which often encounter the issue of computing collisions inside real-time environments. (Mishkinis et al. 2012) proposes to calculate the surroundings of detailed 3D models to compute collisions with very simplified meshes based on convex hulls. This process makes the evolution of 3D content more alive because the environment responds to the interactions in a plausible way. We can also cite the algorithm proposed by (Loop and Schaefer 2008; Loop et al. 2009) in two of his articles. He introduces a new method of approximating subdivision surfaces (the most used modeling technique of the 3D artistic CAD tools) with hardware accelerated parametric patches, which improve the memory bandwidth requirements for patch control points. This improvement allows an extension of the number of polygons displayed by the computer, making it possible to add more details to the model. Post-production effects are also often discussed in this field of literature. They can be used to apply special rendering effects to 3D models. In his paper, (Kowalski et al. 1999) had the idea to build on the ability of artists and illustrators to evoke the complexity of fur or vegetation with relatively few strokes on the boundaries of objects. The algorithm tested is able to render fur, hair, grass and trees, and it was implemented within a broader network that supports procedural stroke-based textures. This capacity to create a library of various styles and rendering appearances is still very active because of the length of the potential list. Every trick that could reduce the total number of polygons (which determines the rendering performance of the computer) while raising the richness and density of details is of tremendous importance. The final aspect also falls in this category: the style and appearance could be computed as an ultimate layer of the rendering of the object. Walt Disney studios recently published on the process they used for their Oscar winning animated short film *Paperman* in 2012. In his article, (Whited et al. 2012) explains how a hand-drawn appearance can be achieved with computer-generated models to make the final animated movies look similar to the old animated movies that were drawn by hand.

2.2.2 Interfaces for manipulating artistic digital content, mimicry of the artistic physical world and uses

Software designers and researchers propose new types of interfaces specially designed for 3D artists. They aim to mimic the artists' methods of working inside their physical studio. The most visible strategies are the mimics of the sketch and of the clay modeling designing steps. For example, as early as 1996, (Gross and Do 1996), in his paper oriented for conceptual and creative design, proposed a system able to recognize and interpret drawings. It uses glyphs to trigger specific content and interact with it. Researchers also proposed prototypes of software for creating fast simple models, inspired by entertainment. For this specific class of models, several projects and papers explain how to exploit the drawing interfaces. We cite a paper by (Igarashi et al. 2007) and colleagues, who worked on the project of creating 3D shapes from a sketched Two dimensional (2D) input. The same team (Nealen et al. 2007) contributed and built a second paper on this preliminary work. This technique is intended to be simple and to allow the user to add, remove and deform control curves, which then generate freeform surfaces. The curves can have arbitrary topologies and do not need to be connected to one another, allowing the system to handle both the curve deformation and the subsequent surface optimization. In these works, the pencil plays a role of tremendous importance. Other researchers such as (Keefe et al. 2001) explain how new 3D immersive interfaces can be used to generate artistic 3D content. They propose an artistic medium that uses a 3D analog of 2D brush strokes to create 3D works of art in a fully immersive environment. Physical props and gestures are used to provide an intuitive interface for artists who may not be familiar with virtual reality. This strong mimicry of the physical world is supposed to produce better immersion and to allow a full-body experience for the artists using it. (Zhang et al. 2009) proposes a Virtual Clay Modeling System where the users can directly manipulate the shape of a virtual object as they can do with a clay model in the real world.

In articles about CAD tools for 3D artists, researchers seek methods to increase the capacities of geometrical modeling kernels for optimizing real time and recalculated visualization with the best resolution possible. This focus is because what is designed will exist and evolve inside a virtual environment for which it must be optimized. Shapes are freeform and tend to represent the complexity of nature. The goal for the designers is to give life, to fill up inert virtual objects with life. They want to make the model plausible inside its environment. Inert virtual objects need to appear alive, to have a soul. They need to look animated inside a coherent world and environment. The profusion of details insufflates a backstory, a past and a context. On the other hand, the literature proposes interactions with rich interfaces, offered by the rise of immersive technologies, with a strong focus on sketch-based interfaces and clay modeling metaphors. They try to mimic the artist's studio and ancient techniques. The choice of natural and direct interfaces is explained because the designer wants to control an appearance, a final rendering result, so the model can blend within the virtual environment.

This first review shows how similar issues (such as modeling kernel and interfaces) are differently addressed by the literature when dealing with engineering CAD or artistic CAD tools. We now give an example of such a dichotomy with the issue of textures.

2.2 One common issue, textures, addressed differently

This question seems to be similar for both design environments, but it is answered by researchers and practitioners very differently. Both types of CAD tools require a nice rendering of the 3D designed product inside its environment, but for different purposes.

The engineers require good rendering engines and libraries of materials to assess how the object under design will look inside its future real-world environment and to optimize the fit between the two. Engineer CAD tools try to integrate a library of materials with properties as close to the real ones as possible. (Choi and Cheung 2005) proposes a new and innovative virtual simulation system for the visualization and optimization of multi-material layered manufacturing. The target is to upgrade the fit between the model and the real product, once manufactured. The engineers seek a clean and precise connection between the two. The engineering CAD tools integrate libraries of industrial materials with properties such as color, stiffness and weight.

The 3D artists have the need to assess, as quickly as possible, the future aesthetic properties of the future product inside its virtual environment, which it will never leave. In his paper, (Lasram and Lefebvre 2012) proposes a new algorithm for simultaneously optimizing the quality and rendering speed for procedural textures. The same team (Lasram and Lefebvre 2012) also proposes interesting features for the control and parameterization of such procedural textures. They deliver interfaces to control the final appearance of the generated procedural textures as well as a preview of this appearance during calculation, allowing fast decision-making. The artistic CAD tools integrate libraries of natural appearances such as skin, trees, fur and sketch strokes.

As a conclusion regarding these two trends of the literature, technologies and interfaces seem to be converging, but indeed, the deep hidden logic of each family of software differs radically. We do not want to be misled by the apparent similitude of some areas of the literature, whereas most of the crucial parts are very different when looking at the geometrical modeling kernels and the needs of the designers.

As the next step, we study the literature about ID CAD. It remains extremely difficult to perceive why and how ID CAD should be different and not simply a personalization or hybrid of the two types we have already identified. For years, there have been proposals for specific ID CAD tools. We investigate the subject in the computer science literature.

2.4 Literature of CAD tools for ID: historical report of a missed correspondence with the needs of the profession

We now identify the main tendency within the literature for ID CAD tools. The report of mismatching was stated very early. In his 1997 paper, Tovey explains the precise differences between the needs of ID and their engineer colleagues. According to Tovey, ID have two great areas of responsibility:

1/ To represent the market and user requirements in determining the ergonomics and appearance of the product.

2/ To integrate the market, user and engineering requirements into a whole design solution.

These responsibilities can be understood as a dual need: on the one hand, to have tools for working on the aesthetic properties of products and their meaning (as artists do); on the other hand, being integrated with the industrial firms and therefore working with 3D models intended

for use in manufacturing objects (as engineers do). The author lists the processes the ID use and clarifies their technical needs in the tools' domain. He also states that the current tools they can use do not satisfy their needs with regard to their functions, the type of objects they can handle, their interfaces and their appearances.

He finally proposes a direction for a renewed family of tools based on sketching and clay modeling techniques transposed to CAD environments. In 2002, he published an article (Tovey 2002) that proposed a hybrid technique combining conventional, sketch mapping, sketch modeling and non-contact scanning techniques. The designers basically generate a 3D mesh that has roughly the shape of the product intended in their sketches. The process uses particular sketches, such as the face, bottom, top and sides of an object. It then maps the sketches on the surface in a type of reverse rendering technique. Tovey states that this hybrid technique retains the speed and informality of sketching and sketch modeling in its craft processes. Similar attempts can be assessed, such as the work of Bae et al. (2008), who proposed software called ILoveSketch, which encourages the ID to express themselves with glyphs and pen-paper metaphors. With ILoveSketch trained designers can draw detailed 3D models using a succession of plane creation techniques and line drawings. The prototype was optimized for use with graphic tablets. We can characterize this project as an attempt to introduce within a virtual environment a mimic of the traditional sketching process. Another angle of approach for the scholar (Thurgood and Clark 2001) interested in the ID profession is to use immersive interfaces to create services close to clay modeling in a fashion similar to that used by 3D artists. However, in this case, the designed objects will be manufactured. The system relies on non-contact digitizing, reverse engineering and 3D touch modeling. Yet, transferring from a CAD model to another type of data, compatible with FreeForm software, requires intensive exports and breaking the link to the source file (where the design tree and all the design features are stored) to obtain what is called a "dead skin". Another model conversion will be required if the designed prototype is validated.

The literature on ID CAD tools focuses on the mismatch between the needs of the ID and the digital tools they have access to. Even with tuned-up engineering environments with specific interfaces, they still lack the capacity to express themselves freely due to the specific modeler kernels designed for parametric modeling, a way of representing objects different from their expertise. It is interesting to note that scholars did not even bother modifying artistic CAD tools to address ID needs due to the non-manufacturable models they generate. On the other hand, very creative prototypes have been proposed, but they also lack manufacturing integration, and the models they generate can only be integrated into industrial environments after data conversions (Thurgood and Clark 2001) that involve heavy losses of information. These data conversions are called the "design-gap" (Tovey 2002; Dorta et al. 2008) in the literature. After more than 15 years of attempts, not a single one is used by ID on a daily basis.

The two hypotheses we must reject on the basis of this literature study are:

Hypothesis 1:

The CAD tools for ID can be adapted from engineering CAD tools.

Hypothesis 2:

The CAD tools for ID can be adapted from 3D artist CAD tools.

3. Research gap and hypotheses: in need of new reasoning models

The challenge of making simple modifications to existing families of CAD tools to fit the needs of ID appears impossible to solve according to the computer science literature. On one hand, it is very difficult to make CAD engineering tools more able to address the intensive density of various types of details and adopt more natural interfaces. On the other hand, making artistic CAD tools able to deal with genericity would change their underlying nature and seriously alter their performance. Both strategies have been tried for years, but after all that time, the problem has not been solved. The profession of ID is now well-established historically (they are said to have existed for almost a century), and they have been present in industrial environments, such as the automotive industry, for more than 60 years. Nevertheless, successful tool development has yet to be reported. ID lack dedicated tools that are able to address their specific reasoning and design processes while integrating them inside industrial environments. Even 15 years after the first papers on the use of CAD in industrial design, ID are still struggling inside companies to find the right tools, not only to express themselves but also to communicate with other designers and fully participate in the whole design process. We maintain that perhaps this lack continues because the research gap is being approached the wrong way. As the first two hypotheses have been invalidated by years of literature and practitioners' day-to-day reality, we must propose another hypothesis:

Hypothesis 3:

The ID require their own specific CAD tools and cannot be satisfied with simple extensions of tools made for other professionals. They require specific reasoning tools to support their activities, which need to be understood and modeled.

4. Research questions

From the research gap, we can deduce that we will require a new method to identify such tools. Perhaps specific tools already exist, but computer science is not yet able to characterize them.

General research question:

What is the analysis frame for studying the design reasoning of professionals using CAD tools?

The first challenge of this paper is to understand where the issue is and what makes things so difficult for ID. The second will be to model the logic of every single tool, including the two historical categories of CAD tools for engineers and those for 3D artists. We will show that ID CAD tools may already exist but could not be identified as such by scholars for very specific reasons. As a final step, we will give prescriptions for the design of new CAD tools for ID. We maintain that the research gap can be explained by one crucial reason, the difficulty for a single academic discipline to grasp this issue in its entirety. To understand and characterize the needs of ID, it is necessary to simultaneously interrogate cognitive science, computer science, and the science of organization and management while not omitting design theory. The literature finds it very difficult to show the difference between the digital tools in the two historical categories. It will be even more difficult to identify the discrete identity signature of the tools for ID. By focusing on only a restricted set of disciplines, the designers of these software programs tried to address the needs sequentially. This type of description cannot grasp the fundamental differences

between the two families, CAD tools for engineers and CAD tools for 3D artists. In consequence, the ID struggle with a mix of software and traditional methods. Moreover, they are only able to act during the design process at very specific steps: either at the beginning of the process, during the conceptual phases, or at the end of the process, when it is sometimes required to make an ugly object beautiful. They lack the coordination tools to design and follow the design process throughout.

We maintain that the lack of fitness of ID tools can be explained by the difficulty of describing the necessary properties of CAD tools for ID and how they can be created from the existing knowledge. A description of the tools based on technical features and interfaces is not sufficient. This analysis and description of the tool does not adequately address the particulars of the design activities.

Hence, our two research questions are as follows:

Research Question 1:

How can we characterize the underlying design processes of the archetypal CAD tools of the different professions? What is the specific model of ID CAD tools?

Research Question 2:

What design strategies could be mobilized by software firms to create these characteristics?

5. Method

We observed that the latest developments in the technical literature on the subject of CAD tools for the ID found themselves trapped inside a technical perspective that has not been solved in decades and does not seem to be consciously aiming at a specific path.

5.1 A new perspective on CAD design tools with design theories, computer science, and design organization

To differentiate the different families of CAD software, we will rely on recent findings in the design theories that allow a better characterization of the specificities of the design processes and the CAD tools mobilized for them.

1/ It is possible to characterize what is known and what is unknown during a design process. Design is a situated activity that implies the manipulation of knowledge (about the known) and concepts (management of the unknown).

2/ Design is a generative process. It allows the progressive creation of new objects, values, products, uses or technologies and the creation of new knowledge (which may or may not be related to the final artifact).

3/ Design theories offer a characterization of the evolution between the known and the unknown. From the known, it is possible to organize the unknown (where to look for new knowledge), and the explorations of the unknown can generate new knowledge.

From these theories, we are able to construct an analysis frame, a generic model that fits all types of design processes and design professionals.

-For the input, instead of speaking of objects, we will use languages that allow a depiction of the known, while preserving the unknown part. We choose to characterize the method of going from the unknown to the known using findings adapted from the work of (Suh 2001). The Design Parameters (DP) are the method of action of the designers: namely, what they can choose or parameterize, and where degrees of freedom exist. For example, they can be a form factor, a dimension, a material, or a specific painting technique. The Functional Requirements (FR) are the design targets of the designer. The FR are used to describe the expected performance of the design. They can be a tolerance, a mass, a dimension, a specific meaning or a style. In certain cases, relationships can describe some already known parameters between DP and FR. For example, it could be mandatory to use a specific material to achieve the expected performance.

-The outputs are the new DP, the new FR and the new relationship between them once the design step with the CAD tool has been carried out.

-We will also characterize the criteria of success, the performance expected from the tool at the design step.

Category of CAD tool	FR-input DP-input Relationships between them	FR-output DP-output Relationships between them	Criteria of success of the considered design step
----------------------	--	--	---

Table 1 Tracked parameters for analyzing CAD tools

5.2 A design brief protocol for the three classes of professionals

We propose a protocol based on the design brief of an object, which could be part of the daily work of any CAD user we want to study: engineer, 3D artist or ID. To be able to assess the capacities of the CAD tools, we mobilized the design of a new motorbike tank. This design can be mapped to three different design briefs, each of them aiming at a specific class of professional designers. This product has been chosen because it could be designed by any of the three categories of professionals. It exhibits technical, style, use and aesthetics constraints. With this use case, we will highlight two aspects of the design process: the different design steps and what is designed. We will also try to unfix ourselves from the 3D representation displayed on the computer screen. We will stress how the different designers manage to explore the unknown and combine the known. In our example, it is expected from the designers to create a “dynamic, muscular” tank.

This design exercise will be applied to three specific CAD tools that are considered archetypal or canonical by the designers themselves. As a first step, we will study an archetypal tool of each category of product: a CAD tool for engineering design, a CAD tool for 3D artists and a CAD tool for ID. We chose software used by professionals on a daily basis and considered as a reference. We will focus on the FR, the DP and the relationships between them.

-The use case of the engineering CAD tool will be conducted with SolidWorks software, a product edited by Dassault Systèmes. This CAD tool was developed for engineers working in all type of firms, from large to small, from various industries such as robotics and musical instruments. It is specialized for volume modeling, while still being potent in surface modeling. It is based on the paradigm of procedural modeling. It is connected with many different

“workshops” for design analysis, such as resistance, weight measurement, and mechanical animations.

-The use case of the artistic CAD tool will be conducted with Zbrush software, a product edited by Pixologic. This CAD tool was developed for 3D artists working in entertainment, such as 3D animation, movie special effects or the video game industry. It is specialized for the precise modeling of biological materials and original objects for virtual environments. It is based on the paradigm of clay modeling. It is connected with many different “workshops” such as rigging (animation and deformations) and rendering.

-The use case of the CAD tool for ID will be conducted with CATIA Imagine and Shape software, a product edited by Dassault Systèmes. This workshop was developed for ID working on the form and aesthetics of products in all types of industries. It is specialized for the modeling of qualitative shapes, and it draws from the whole CATIA environment. It is connected with many different “workshops” suited for every step of the design process and most of the different types of technical expertise (e.g., mechanics, electrics, hydraulics), from ideation to design refinement and production. Its modeling kernel, interface and integration have been identified in previous work (Arrighi et al. 2012) to have specific capacities.

5.3 Evidence regarding the archetypal current CAD tools backed up by a full historical perspective of these tools

As a second step, we will back up our findings with a historical study and perspective to assess the development of the precursors of these cutting-edge software tools and to explain why they were engineered this way and for what purposes. We will model the different reasoning of the professions and the underlying logics of the corresponding software.

We will again track the way these specific categories of tools evolved to allow their users to manipulate DP to address FR, the relationships they manage to generate and the expected criteria of success at the time they were designed and introduced to practitioners.

The review shows that, generally, the evolution of the design tools was deeply linked to the evolution of the corresponding design professions and ID, who had difficulty abandoning traditional physical tools such as mockups. ID were naturally pushed to adopt existing tools (built for the engineer or graphical artist) when they did so. The historical analysis starts with a review of the evolution of engineering design tools. Then, we review the evolution of graphic art tools (we include, in these broad categories, tools from 2D graphic creation to 3D animation tools and technologies). Finally, we discuss the origins and practice of industrial design, and we reveal the specificity of tools needed for the holistic approach of ID. The challenges will be explained with respect to the currently used technologies in engineering design and graphical art tools.

6. Results

6.1 Archetypal cutting edge CAD tools for engineers, 3D artists and ID

6.1.1 Designing with an engineering CAD tool. Manipulation of a set of predetermined DP and FR and the creation of relationships among them, within a validity domain

Historically, CAD models used a perfect mathematical description of the constituent entities (dots, lines and surfaces) because high precision was needed to build the designed product with computer numerical control (CNC) machines. The 3D models they generate are built step by step into the software by successively creating entities and applying commands to them. To create a model, the user must master all the steps of the construction and have a precise mental or physical representation of what he wants to design. An archetypal engineering CAD tool uses procedural commands, and the modeling process is a succession of steps where the construction of blueprints (called 2D sketches in the software) is followed by the iterative use of parameterizable functions (such as extrusions, revolutions or sweeps). The tool is capable of producing surfaces of very high quality (up to Class A standard, the highest in the industry).

We take as an example the building of a motorbike tank. The designer starts with a restricted set of DP such as materials, manufacturing processes and FR to achieve specific volume, weight and stiffness properties. The motorcycle tank will be manufactured and assembled before being used in the real world by the buyer of the motorbike. It will have to face real-world constraints such as rain, sun, and gravity, and must be compatible with norms, rules and legal obligations. The design brief given to the engineer clearly delimits its design field. It defines his degrees of freedom (characterized by the DP) to address the very specific requirements given to him. In fact, even the decisions are bound inside a specific design space. What is expected from him is the capacity to generate an algebra of rules to link constraints such as length to design parameters such as the form factor of the tank.



Fig. 1 Perfect correspondence between the model and the real object, up to tolerances

During the design process, the engineer will configure a **pre-established and mandatory** set of DP to reach known FR. The engineer uses commands and functions step by step to construct the virtual mockup, and doing so generates what is called a **design tree**. The design tree is the successive functions and parameters and the relationships among the different geometric entities. Because the design tree allows the generated base of rules to be reconfigured, it is possible to feed different parameters to the functions or to rearrange the function to obtain a different result. It is not a single product that is designed; in fact, it is a parameterized and reconfigurable base of rules that can generate a family of products. The base of rules is parameterized for one given optimized result. Each command and function is based on specific measurable parameters such as lengths, angles, radii and geometrical relationships between entities. Once **configured** properly, the DP will be able to achieve the desired FR.

The result of the design is not a single product but rather an algebra of rules. This algebra of rules defines how the different components are spatially positioned as well as the links between them, the functions and their parameters. This algebra can be mapped to a potential

infinity of solutions. These solutions are various parameterizations of the same algebra. There is a local optimum according to each DP that can be reached by different configurations. It is the job of the engineer to propose the best compromise between FR and to guarantee that the set of created rules is robust to variations in DP (e.g., different material or manufacturing method) or even FR (e.g., modified volume requirements or a new legal regulation created during the design process).

Digital engineering is a design process of **massification and generalization**.

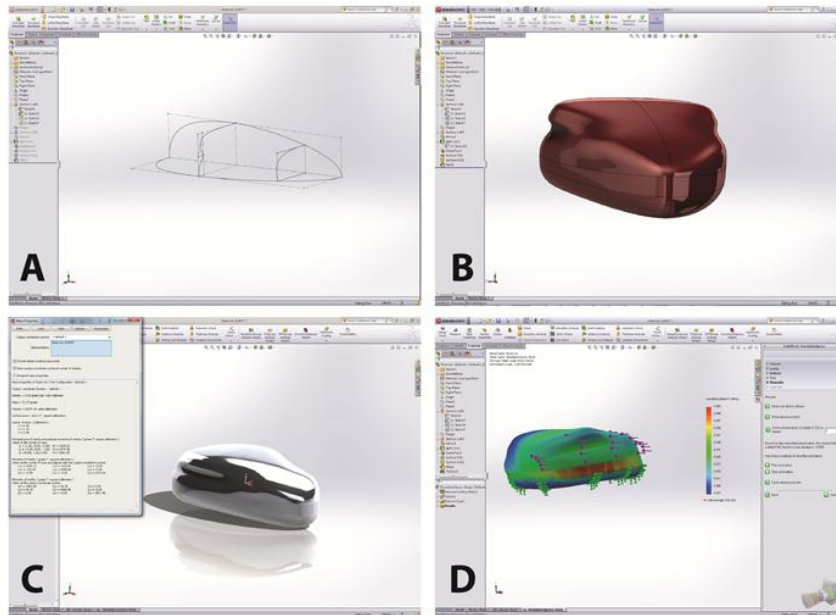


Fig. 2 Four canonical design steps of the engineering CAD tools.

a Sketching on 2D planes with Non-Uniform Rational Basis Spline (NURBS)

b General aspect of the final result

c Stiffness simulation inside the tool

d Volume and mass assessment inside the tool

6.1.2 Designing with an artistic CAD tool. Manipulating a dense list of DP and extending it, following prescriptions

The CAD tools for 3D artists were at first based upon polygonal modeling techniques. Polygons are ideal for constructing a model step by step and simultaneously managing its final rendering properties, while being able to optimize the final size of the data, a very important issue for 3D real-time rendering. Recently, in 1999, a game changer was introduced. It was called Zbrush, and it quickly became the reference for 3D modeling artists working in the entertainment industry. It has serious competitors working on slightly different principles, but for dealing with artistic modeling, one of the first phases of the entertainment design process, Zbrush has proven to be the best in terms of its raw capacities. It relies heavily on the clay sculpting metaphor and is unmatched in its capacity for producing very detailed models.

The most common use of ZBrush is for creating and editing digital models that are then animated and rendered in other 3D packages, such as Autodesk's Maya and 3ds Max, or in Softimage XSI. Artists choose to create and edit models in ZBrush to use in another package because the unique

technology behind ZBrush allows them to work with very dense models (up to 10 million polygons) to create a stunningly rich level of detail on organic surfaces in a way that traditional 3D packages simply cannot accommodate due to performance display issues (Keller 2012). Its geometrical kernel is built on the concept of 2.5D with elements called Pixols. This technology allows computers to display a very high number of polygons, which are directly related to detail modeling. ZBrush is programmed in such a way that a 3D object can have millions of polygons and an astonishing level of detail while still maintaining a high level of response on the computer during the sculpting and editing process. This lack of latency between stimulus and response is what allows the ZBrush artist to feel as if he is sculpting digital clay, in a very intuitive and artistic fashion (Keller 2012).

The design brief for the artistic 3D profession is usually a 2D sketch or illustration. The ID or one of his colleagues could have prepared it. The reference sketch gives a plan regarding the environment and the object that will be designed, in this case a motorcycle tank. The prescription can be detailed with colors, but usually it is mostly guidelines. Even if the prescription is detailed, the designer will not necessarily keep every proposed detail. He will select the details he finds most relevant and progressively extend them so the model he creates is unique. The motorbike will never be manufactured; it will stay inside a virtual, controlled environment. To obtain a muscular tank, the artist knows he must exaggerate the muscular aspect of his design; he must make it obviously visible and show his intent. To obtain this result, he must provide a dense and rich list of interwoven DP and FR to reach a profusion of details. He will even add extra refinements and features. This high level of detail is necessary because later in the process (following steps of the entertainment design process such as rigging, materials mapping, animation, and lighting), some of its initial details might be lost. Even so, the design will continue to scream its meaning. At the beginning, the designer has a collection of **recommended** DP and FR. He will freely manipulate the DP and FR, add some and suppress others, under the guidance of an artistic director. As long as the design maintains correspondence and coherence with the initial prescription (the 2D sketch) he will fulfill his job. Unlike the engineer, he does not want to generate a new relationship between DP and FR. He wants to **create a new list of DP and FR**, the longest list possible. For example, to address the FR “make a motorcycle that is 5 years old and used in the desert” he will generate a specific DP: “there are impacts on the front lens, the paint is worn off and decolorized”. He seeks an **extension of the list**. The list is required to become simultaneously coherent with the prescription reference and richer, denser. Detail in the artistic sense is deeply linked with meaning. Each detail must convey meaning and intention to animate the virtual object, as for the example of the desert’s sand and light. In the example below (Picture 4) we see the **profusion of details**, which back up the meaning of the model: It is a motorbike made specifically for a video game, driven by a specific character, in a special environment, under specific lighting, with a detailed painting and with a specific little scratch on the side caused by a collision. This list of FR is addressed by a clever combination of DP: the driver, the joints between the surfaces, the number on the side and the color of the paint. The model was designed to stay inside the controlled virtual environment and radiate its meaning in these very special conditions.



Fig. 3 Motorbike model by Mikhail Semionov

Digital artistic design is a design process of **congruence** with the initial list (the 2D sketched example) and **extension** by adding a profusion of details.

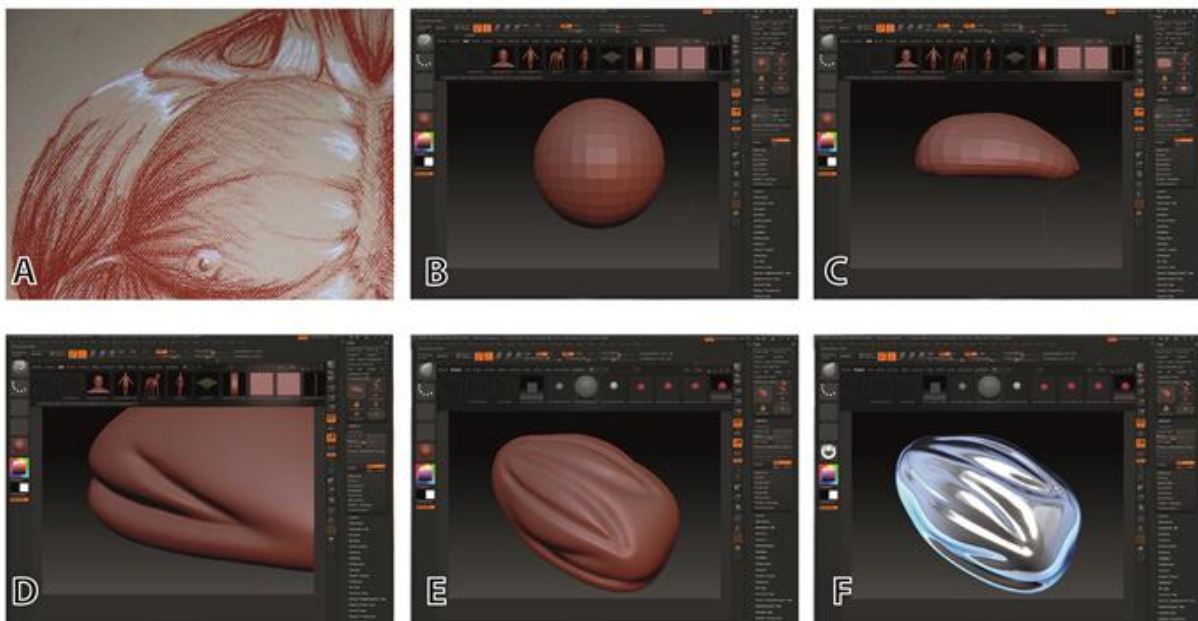


Fig. 4 Six canonical design steps of this tool.

- a Muscle reference
- b Import a low resolution primitive
- c Raw deformation of the low definition primitive
- d Sculpting the ribs at low definition
- e Sculpting additional ribs at high definition
- f Final result with chrome material applied

6.1.3 Designing with an ID CAD tool. Simultaneous manipulation of mixed unknown and predetermined sets of DP and FR to create an original validity domain

CAD tools for ID are relatively new compared to their counterparts for 3D artists and engineers, as they appeared as late as 2005. They are closely related to engineering CAD tools and are integrated into industrial CAD environments, as the final purpose of ID designs is to be manufactured. These tools are the entrance door for ID into the industrial environment, and they provide a common language for designing with others. The software kernel engine is connected to an engineering global kernel that allows the handling of subdivisions. Subdivision is a

technique for the division of an entity. The entity (usually a surface) is divided into a number of patches. The software enables the manipulation of the surface and guarantees at any time the conformation to a set of rules between the patches, such as tangency and curvature. It is important to note that such powerful geometrical kernels, which are able to handle a large variety of different models, arose quite recently inside industrial environments and are why this type of CAD tool, especially those dedicated for ID, took so much time to arise.

The CAD tool studied, called CATIA Imagine and Shape, is a workshop of the CATIA CAD design suite. The global design suite is suitable for any type of industrial design and is made of specialized workshops (i.e., other design tools for specific tasks) that are mutually compatible and coherent. The 3D models generated within the suite are fully compatible among its various workshops. Any creative design developed with either tool can then be transmitted to other designers and has the capacity to integrate industrial constraints. The models generated by the ID tool embed mathematical constraints that ensure that the shapes generated will have a certain standard of quality at any time (curvature continuity, in this case). The software is also innovative in its user interface. The manipulation of the modeled objects is direct and provides instant feedback via a “manipulation box.” This process also allows a very high degree of precision in the creation and modification of shapes. ID can work with substantial control and speed over the formal properties of concepts without invoking commands, functions or even parameters. Interestingly, users sometimes describe this tool as a type of clay modeler.

The brief for the ID consists of aesthetic FR, such as to create a dynamic and muscular motorcycle tank, mixed with industrial FR, such as global dimensions, the process of fabrication and manufacturing cost. The ID usually start with references, such as sketches, pictures or photos, and builds his proposition using material called mood boards (Bouchard et al. 2008). The motorcycle tank will be manufactured and assembled before being used in the real world by the buyer of the motorbike. It will have to face real-world constraints such as rain, sun and gravity. It must also be compatible with norms, rules and legal obligations. At the same time, it is supposed to satisfy specific usage and aesthetic constraints that are harsh or impossible to measure. The ID make a successful design when they manage to address every FR with a combination of DP. The design process usually requires extended creations of details that engineering CAD tools are not capable of. Once the ID has explored his design with a high density of details (usually a property of 3D artist CAD tools) he will have to **project** these details inside a restricted set of parameters, in the data format of a manufacturable file, thereby creating what is called a **conceptual model**. This conceptual model is the projection of a large variety of DP (such as lines, curves, surfaces and their parameters) inside the industrial environment. The projection makes a restriction of the list of the parameters, therefore transforming every single DP in only one, the degree of dynamicity of the tank. In this case, the conceptual model is the instruction about the character lines of the tank, which makes it muscular and dynamic, as well as how the character lines respect the surface quality: their position, thickness, orientation, style and artistic influences. The conceptual model is the sum of all that, expressed with the intention of the ID, and translated into the measurable world of industrial environments and tools. The software requires the ability to **first extend** the list of DP and FR **before projecting** them (restriction) inside a **conceptual model**.

This process creates a new algebra base that can be activated and parameterized on demand once characterized.

The design target for the ID tool is the ability to generate conceptual models, meaning that the result is not only the particular shape obtained but also the specific parameterization of it, embedded inside it. Each time the ID uses the software and makes a new object, he simultaneously invents a new grammar, namely a conceptual model. He has more possibilities of expressing himself freely because the interfaces and models allow him to work with the artist metaphors (so he can explore and work with prescriptions), yet at the same time he expresses himself in an engineering language and data format. In the end, this type of product is more than a hybrid. It possesses some of the properties of both the engineering and artistic CAD tools with one more capacity, the generation of conceptual models. **It is the capacity of creating conceptual models that makes this type of tools suited for what we call mass singularity.** The local optimum designed by the industrial designer is a specific configuration of his conceptual model. The model exists for a given parameterization, on a domain of validity, which is assessed by the designer himself. The performance of the design is creating a conceptual model valid on the largest domain possible. This domain is the robustness of the ID design. Digital industrial design is a process of creating **mass singularity**. The result of industrial design is a **new conceptual model**.

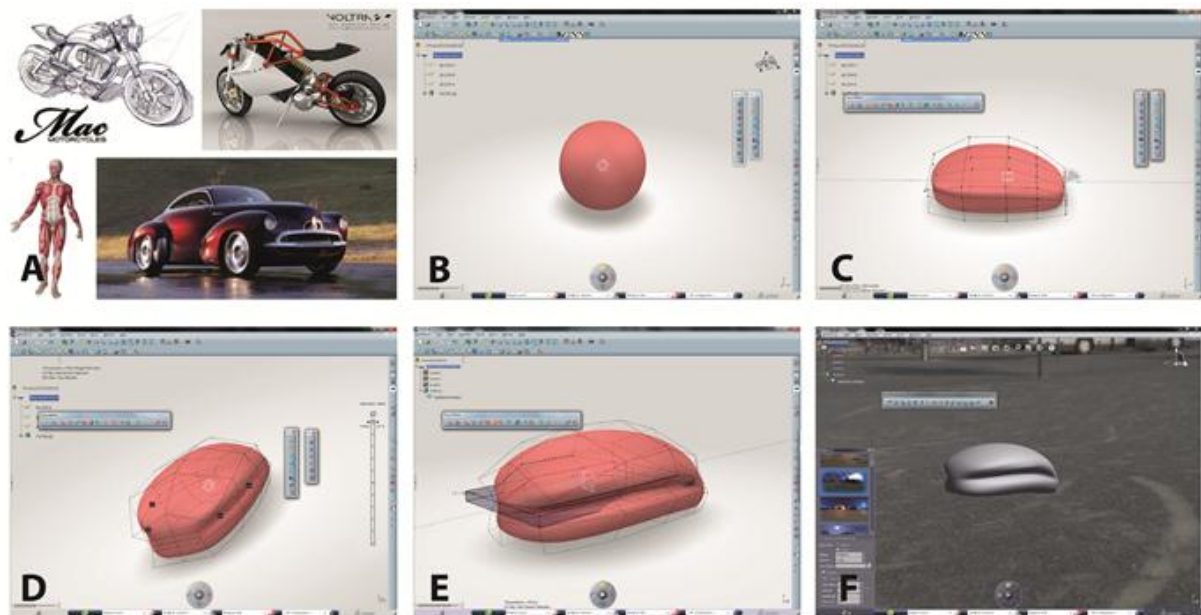


Fig. 5 Six canonical design steps of the ID CAD tools.

- a Reference
- b Importing a primitive
- c Playing with the shape manipulators
- d Applying constraints over the manipulation cage
- e Editing the parameters of the rib
- f Final result inside an urban environment

6.1.4 Conclusions on the archetypal CAD design tools

Category of CAD tool	FR-input DP-input Relationships between them	FR-output DP-output Relationships between them	Criteria of success of the considered design step
Archetypal Engineering CAD tool (SolidWorks)	Mandatory FR-input Mandatory DP-input Partial relations between known correlation between DP and FR	FR-output = FR-input DP-output = DP-input A robust domain of solutions linking FR and DP	Size of the domain Degree of performance of the local optimums Robustness of the domain to both DP and FR modifications
Archetypal Artistic CAD tool (Zbrush)	List of wanted FR-input List of wanted DP-input A list of imbricated DP and FR which describe a unique prescription	A new list of wanted FR-input, others different A new list of desirable, some similar to DP-input, others different A new list of imbricated DP and FR with more details and meaning	Extension of the list Density of details Unicity (originality) of the list Superfluous DP answer superfluous FR giving the next designer the most precise intention Congruence between initial and final list
Archetypal Industrial Designer CAD tool (CATIA Imagine & Shape)	List of wanted or mandatory FR-input List of wanted or mandatory DP-input Partial relations between known correlation between DP and FR A list of imbricated DP and FR which describe a unique prescription	A new list of FR where measurable FR are preserved and answered A new list of DP where measurable DP are preserved A new conceptual model	Fabrication of the conceptual model Robustness of the conceptual model to both DP and FR modifications Degree of performance and originality of the optimal conceptual model configuration Congruence between initial prescription and final model

Table 2 Characterization of the three archetypal CAD tools

After this analysis based on the use cases of archetypal tools, we are able to characterize from a design perspective the differences among the categories of CAD tools and why they are suited to their specific design users.

-Engineering CAD tools seek to generate the best possible algebra of rules between the prescribed FR and DP. This algebra must be valid on a domain of DP and FR; the wider and more robust this domain, the better.

-Artistic CAD tools seek to generate the most detailed/refined unique list possible of coherent FR and DP.

This list must be as long and as original as possible, in congruence with the prescription.

-ID CAD tools seek to do a little of both at the same time (algebra, but with a restricted set of parameters, side by side with a detailed/refined list of coherent FR and DP), but in this case, the final result is the creation of a conceptual model.

The conceptual model configuration optimum must be as original as possible with the largest domain of validity. It is the projection of a great number of parameters inside a single domain; the conceptual model of the “dynamicity” of a motorcycle tank in our brief example.

We will now verify if this hypothesis stands correct from a much longer perspective. This analysis is taken from the work of (Arrighi and Kazakci 2013), which attributes the mismatch between ID CAD tools and their needs to the tropism on CAD tools for engineers and 3D artists.

6.2 Historical evolutions of CAD tools for the respective professions, summing up previous evidence across past decades

6.2.1 Evolution of engineering practices and repercussions for engineering design tools

The first recorded use of curves for manufacturing was in early Roman times for the purpose of shipbuilding. The designers used templates and full-size drawings on the ground to produce a ship's ribs, and thus a ship's basic elements could be *stored* and did not have to be redesigned every time a new vessel was to be built. Early design theories such as (Redtenbacher 1848) had the ambition to teach craftsmen and engineers how to produce efficient and standardized machine designs. The method pre-supposed that the machine architecture is known and the

design effort is about the dimensioning of the different parts, based on a maximal reuse of knowledge. One of the most influential design companies in the early 20th century, the Boulton Locomotive Works (Le Masson and Weil 2010), also used a parametric design approach facilitating the reuse of previous design episodes. Fifty years later, this method of mass design was dominant in every industry. At the beginning of the 20th century, with the generalization of mass production in the industry, mostly under the impulse of the newly born automotive sector, the choice of design tools became even more critical for the reusability of increasingly complex knowledge. A major shift occurred in design practices with the appearance of CNC (Computer Numerical Control) machines, which provoked dramatic changes in engineering design practice. The automotive industry, dominated at this time by the *Big Three* (Ford, GM and Chrysler), was looking for a simpler way to produce CNC machine instructions for the milling of various shapes. The initial main use of computers was indeed not to model complicated surfaces and volumes but simply to *produce the information necessary to drive the tool's* trajectories of milling machines. Many attempts have been made to create tools to help engineers draw the trajectories instead of sampling and defining all the points through which the tool needed to pass. The most successful attempt came from Pierre Bézier. Instead of defining a curve through its points, he used control points placed on the tangent lines, allowing both a better drawing experience and easier control for adjustments (Bézier 1972). The aircraft industry had slightly different requirements. During the post WW2 period, a technology boom occurred: because this domain was using specialized and cutting-edge technologies for the development of high-speed and high-altitude aircrafts, they needed adapted tools. Their flexibility was then critical for both devices and components to be redesigned after failures in the testing or use of mandated serial adjustments in the materials, processing and machining setups. They had the constant need to revise and reuse blueprints, which paper media made very cumbersome (Farin et al. 2002). They also needed to produce a *large variety* of representations of their assembly, sometimes in full scale, which is rather different from the automobile industry. This necessity to accelerate and increase the reliability of the management of complex blueprints explains why aircraft builders, such as Lockheed Martin, developed their own CAD solutions. The term “Project Design” was coined in 1965 to integrate the *parametric manipulation* of shapes, where objects such as *lines*, *points*, and *circles* were parameterized, and then functions such as *offset* and *dimensions* were applied for the most basic processes (Weisberg 2006). The 2D limitations of CAD tools prompted Dassault Aviation, in 1978, to develop a 3D in-house design tool to address some specific parts of the process, such as the design and assembly of plane wings. It was necessary to have precision at the level of microns on parts that were sometimes larger than dozens of meters. The principal capacities of the 3D CAD tool, called CATIA, were 3D design, surface modeling and NC programming (Daloiz 2010). Using both for modeling applications and the machining of surface geometry, CATIA made it possible to reduce cycle times, improve quality and optimize production efficiencies (Daloiz 2010). This capacity to entirely design complex 3D objects signaled the rise and reign of the Digital Mock-Up (DMU). These CAD tools are now evolving to address Product Lifecycle Management (PLM) and Product Data Management (PDM).

6.2.2 Evolution of 3D artists' practices and repercussions for 3D artistic design tools

This category of tools has a legacy in two academic fields of literature, which emerged later on in the 60s. According to (Umbaugh 2005), the field of image processing grew from signal processing, while the computer science discipline was largely responsible for developments in computer visualization. The tradition of digital imaging gave birth to many 2D illustrative

software programs that are still widely used today for graphical illustration by ID. The best-known creative suite is the one from Adobe, with Photoshop and Illustrator. Photoshop was at first dedicated to digital image editing but is now widely used for the creation of digital content through its drawing capacities. Illustrator was at first a font editor, but its vector graphics editor capacities soon made it the standard for drawing with vectors. It relies heavily on Bézier curves for the drawing of shapes and curves. Both programs have the ability to be interfaced with graphic tablets using a stylus. The capacity to interact with the computer more naturally than with the input of code and command lines was addressed by the work of Ivan Sutherland in the 1960s (Sutherland 1964). He used a computer that was produced at MIT's Lincoln Laboratory to create a project called SKETCHPAD, which is considered the first step of drawing interface. The software required the use of a light pen. Computer graphics were first used to create 3D wireframes in the domain of entertainment in the 1970s. This need was pushed by the film and television industries, as well as science fiction, because these hi-tech special effects gave the movies a futuristic look that had never been seen before. Many TV series such as *Battlestar Galactica* and *Star Trek* required the intensive use of CGI (Computer Generated Imagery) effects. The movie *Star Wars Episode IV: A New Hope* also contributed to the need to create structures capable of developing such technologies and inspired George Lucas to found the famous Industrial Light & Magic in 1975. The wireframe was a first step needed for the representation of 3D objects, but it only specified the contours and made images that appeared very different from how we see things in reality, where surfaces absorb, transmit or reflect light. Once computers became powerful enough to generate dynamic 3D models in wireframes, they quickly gained the capacity to process what are called surface models. Polygonal modeling became very popular; it also became the standard for entertainment CAD design tools. The polygons could be built and defined with wireframes and are the most basic surfaces possible that can be defined in 3D. The polygons are very easily defined, and the operators for modifying them rely on *simple metaphors* such as *displacement and scale*. The polygons are a very scalable material, which means that at practically no cost, a model can be refined simply by adding smaller polygons. Therefore, an artist could best fit the capacities of the machine by displaying them for a good rendering. This modeling technique made the *possibilities of animation and deformation* of geometries easier. The deformation of polygons is easy to handle, as it is only a displacement of the dots defining them. The polygons are ideal for calculating the rendering of objects. With direct control of the polygons, artists could *easily control their surfaces and their reflection* before the final optimized rendering, because they had access to what the surface would be made of. Another step was taken when Ed Catmull (Catmull and Clark 1978) introduced the subdivision technique. With this technique, it became possible to manipulate polygonal meshes and then to transform them into smooth surfaces by a process of “chopping off corners” in a reversible fashion. It was the dominant modeling technique in this category of software until it was taken over by Pixols. Pixols were a revolution, allowing artists to work with 3D models made of millions of polygons, a previously unseen degree of density of details.

6.2.3 ID' practices and the mismatch with both previous CAD tools families, stressing the necessity for specific tools

Along with engineers and 3D artists, another profession that is in need of digital design tools is ID. (Forty 1992) explains the appearance of ID at the beginning of the 19th century; in the industrial revolution era in Great Britain, the design process began to drastically change. Instead of craftsmen working alone and designing unique objects, an industrial organization appeared

with managers and a working class. For manufacturing serial production, the newly born companies needed to design their products, first by copying older products (e.g., the Portland Vase of Wedgwood) and following trends (e.g., the strong demand of consumers for antique art, furniture and dishes). The firms started to make contracts with professionals who could design and represent products that would sell (which meant with aesthetic and stylish properties) and could be manufactured in a pre-industrial process with a quality standard. Linked by these two imperatives, **being neither artists nor technicians but sharing competencies from both these worlds**, industrial design was born. ID can be found in many different specialties, as this profession addresses graphics, transportation, products and packaging. However, as we will see, ID suffer from a particular curse: **they need to control or master the final appearance and usage of a product by only giving an approximate definition at the beginning of the design process**. Moreover, they mostly rely on a limited and traditional tool bag, with items such as mockups and sketches, to work with. Both the engineering design and graphical art professions were able to reuse the knowledge developed by academicians in the field of mathematics and computer science to create their own software. However, because they do not share much in common (they manipulate different models and do not have the same capacities for manufacturing, editing, animating and rendering), they are usually not compatible, and it can be even more difficult with the heavy use of 2D tools at the beginning of the process. Transforming objects from one world to another is possible, but data are lost in the process (Kim et al. 2006). Here, we can see the dilemma that the ID face. The industrial companies who hire them ask them to produce creative concepts. To be able to express their ideas freely, they tend to use tools from the artistic world, but these are poorly compatible with industrial CAD tools (Arrighi et al. 2012). On the other hand, the engineering CAD tools are very well integrated, as the standard media for design. However, being designed for engineers, they tend to dissect and decompose designs in contrast to the holistic approach of an industrial designer. As such, engineering design tools are not suitable for intensive creativity (Robertson et al. 2007) and do not give ID the opportunity to work with their principal innovative capabilities, aesthetics and meaning. **ID seem to be trapped between two types of tools they need to use, none of which were made for them.**

Category of CAD tool	Remarquable evolutions	Ultimate objective
Engineering CAD tools	Variety and number of DP and FR Complexity of the base of rules and their robustness	Infinite base of rules for addressing every FR with any given DP
Artistic CAD tools	Variety and number of DP and FR Density and unicity of the combination of DP and FR	Capacity to add infinite amount of relevant details when needed
Industrial Designer CAD tools	Capacity to generate a conceptual model	Automatic generation of conceptual models from lists of DP and FR

Table 3 Characterization of the three archetypal CAD tools

6.2.4 Conclusions on the historical study of CAD design tools

This historical analysis strongly supports our previous findings:

-Engineers require tools to address the whole design process, from the initial concept to the manufacturing and even maintenance steps. They need the capacity to handle complex lists of technical DP and FR to generate sets of rules between them. The more algebra available and the wider these set of rules get, the more the design process improves, with increased quality, speed and cost.

-3D artists require the ability to control a profusion of DP for addressing dense and specific FR. At each evolution of the tools, the DP became denser and more precise, addressing all the facets of an object in its environment to convey the meaning of the FR. They need CAD tools able to animate their models by controlling the most possible dimensions of their design, to make it unique and original.

-ID, with both technical and artistic competencies, have been trapped between these two worlds until very recently. They need to address a large variety of FR inside industrial environments and to have the capacity to generate new conceptual models.

Hence our findings about RQ1 and RQ2

>We have been able to characterize the underlying design processes of the archetypal CAD tools of the different professions with our design theory model.

>We are able to understand the mismatch of CAD tools for ID of past decades.

>We are now able to propose two strategies for successfully addressing the requirements of ID.

7. Conclusion and discussion

7.1 The characterization of each archetypal family of CAD tools

The identification of CAD tools for ID also yielded very important insights regarding the CAD tools for their counterparts, engineers and 3D artists.

7.1.1 Engineering CAD tools

In this type of CAD tools, there are no modifications of the initial DP and FR. The design expansion is the making of a rule defining the relationship between DP and FR, with DP and FR both being valid. The target for this class of designers is not to design a single object, but rather to obtain a family of objects defined by the same set of rules. By varying the parameters of the rules, it is possible to generate a large collection of different objects. We call this tendency **mass variety**. The global tendency of this type of software is the capacity to generate rules addressing more DP and FR, implying more heterogeneous disciplines, and to validate them across wider and more precise domains.

7.1.2 CAD tools for 3D Artists

The 3D artists require the ability to expand to a maximum the list of DP and FR. There are no rules and domains, only a unique result that is required to be as dense as possible in details and meaning. They build ad-hoc relationships between DP and FR, and there is very little information about the relative importance of any given DP or FR. Some DP and FR at one step

could be entirely excluded or considered of less importance at the next step (e.g., the relative importance of realism, details or reflections). The target is a singular and original realization. The global tendency of this type of software is to make more FR achievable, thanks to an increase in the number of DP available. We call this tendency **maximal singularity**.

7.1.3 CAD tools for ID

The ID seek new and original DP and FR and at the same time try to generate new rules between those DP and FR. This process is different from engineering design because the rule is not the unique target: the DP and FR must also be formulated and generated. It is also different from 3D artist CAD tool design because the expansion of DP and FR is not enough: there is a need to converge on a restricted list that allows the description of a local domain and a stabilized relationship between DP and FR. The target is to obtain a massive (a new rule suitable on a validity domain) singularity (new DP and new FR); it is the design of a new **conceptual model**. We call this tendency **mass singularity**.

7.2 Two strategies for the generation of ID CAD tools, conceptual model generation

As the main objective and performance of ID CAD tools is related to their capacity to generate new conceptual models from a large variety of DP and FR, we investigated how it is possible to achieve such performance. First, it is important to note that the capacity to generate conceptual models is closely linked to the type of conceptual models desired. In our specific case, we focused on the geometrical types of conceptual models and designs.

Here, we give two possible strategies to generate new conceptual models. The first has been identified in the study of the archetypal CAD tool for ID, CATIA Imagine & Shape. The second is deduced from this paper and might be prototyped soon.

Strategy 1: Modeling inside the constrained environment. This is how CATIA Imagine & Shape works. The design space given to the designer is a place where the relationship between the DP (manipulate a surface) automatically achieves the FR (surface of a given quality). The conceptual model is created by the embedded constraint inside the tool.

Strategy 2: Maximal extension, then generation of a conceptual model. In this strategy, the CAD tool would apply constraints a posteriori while requiring a documented analysis of the design, built step by step.

7.2.1 First strategy to obtain conceptual model generator CAD tools, acquired originality

The designer works inside a specific environment where he is aware of the constraints and is bound to make only models of a given surface quality, a type of pre-applied constraint. The ID can concentrate on the generation of the conceptual model and its originality, as he has the guarantee that his model will fit the industrial manufacturing constraint. The software studied in this paper, CATIA Imagine & Shape, has the specificity to generate objects with only a specific surface quality. It is creative, thanks to its capacity to build innovative designs, and it simultaneously guarantees that the designs will have the required level of surface quality for manufacturing. We could easily imagine software with other embedded criteria for quality; for instance, software able to make only designs suited to a specific type of manufacture. It could also be possible to design CAD tools with the capacity to create models addressing functional constraints. As the constraints are embedded, the ID can concentrate on producing the DP and FR to generate it, which are already compatible and suited for the next steps of the design process.

The CAD tools put the ID in a position to address the design brief by being able to produce only designs that already conform to the next design step. The design suite would be truncated in various workshops, each being tailored for specific constraints and able to orient creativity towards those specific constraints. The criteria of success could be, for example, the innovation for meeting the constraint or the speed of design.

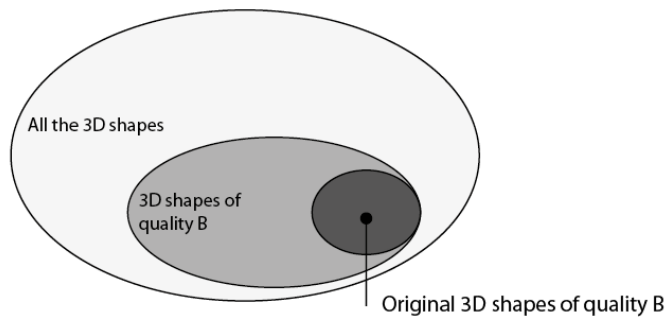


Fig. 6 Acquired originality strategy

7.2.2 Second strategy to obtain conceptual model generator CAD tools, conformation and alternative generation

The designer would have great freedom of exploration, as is possible with artistic CAD tools. In a second step, there would be a post-applied constraint. The software would let the designer explore every dimension he chooses while designing. The software would have a dedicated tool the designer could activate. When activated, the tool would propose alternatives to the design. The alternatives will embed the constraint of choice of the ID, such as the surface quality or the process of manufacturing. It is essential that the tool be able to propose a large list of alternatives without losing the initial intentions of the designs. The industrial DP and FR would be applied after the design step is complete, as an extra layer on the original model. The software would then create several conceptual models, and the designer would pick the best alternative. The ID would then be able to work on one or several of the generated alternatives and then apply the tool again, for another specific constraint, or for the optimization of the currently applied one.

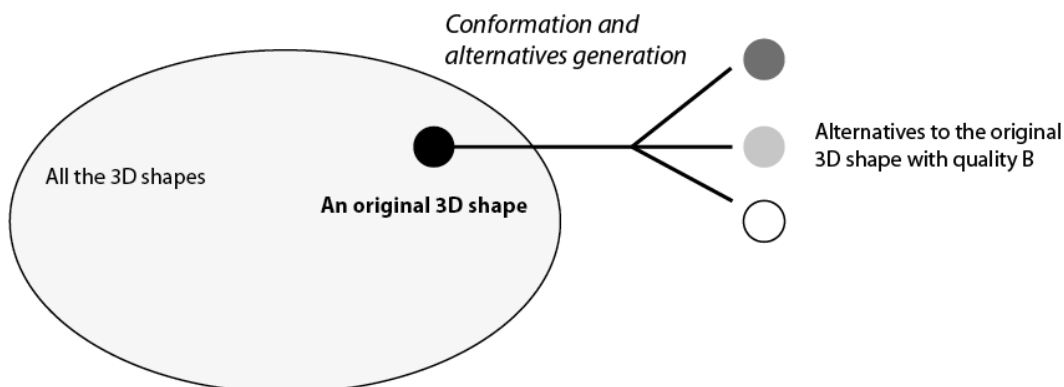


Fig. 7 Conformation and alternatives generation strategy

7.3 Discussion and perspectives

It is very interesting to note that the process of creating conceptual models has been a very active methodology for other designers, specifically, scientists. In our example, the creative designers have created a model for the dynamicity of a motorcycle tank. The conceptual model is a new domain for describing a physically observable phenomenon. When people manipulate the AC temperature in their house or car, they manipulate parameters from a previously created conceptual model. The temperature is a projection of many different parameters such as airflow, humidity and temperature embedded inside a unique controllable value.

References

- Arrighi P-A, Le Masson P, Weil B (2012) Breaking the dilemma between robustness and generativeness, an experimental assessment of a new software design suite. Paper presented at the 19th International Product Development Management Conference, June 17-19, Manchester, UK
- Arrighi P-A, Kazakci A (2013). Lack of integration between engineering industrial design processes. In Proceedings of the 21st International Conference of Engineering Design (ICED'13), August 19-22, Seoul, Korea
- Bae S-H, Balakrishnan R, Singh K (2008) ILoveSketch: as-natural-as-possible sketching system. Department of Computer Science, University of Toronto, Toronto, Canada
- Bezier P (1972) Numerical control; mathematics and applications. John Wiley & Sons Ltd, London
- Bodein Y, Rose B, Caillaud E (2012) Decisional model for KBE implementation in a commercial CAD software. *Comput Aided Des Appl* 9:121-131
- Bouchard C, Omhover JF, Mougenot C, Aoussat A, Westerman SJ (2008) TRENDS: a content-based information retrieval system for designers. In *Design Computing and Cognition '08*, Springer, The Netherlands, pp 593-611
- Bozdoc M (1999, 2003) The history Of CAD. <http://www.mbdesign.net/mbinfo/CAD-History.htm>. Accessed 14 March 2013
- Catmull E, Clark J (1978) A subdivision algorithm for computer display of curved surfaces. *Comput Aided Des* 10:350-355
- Choi SH, Cheung HH (2005) A multi-material virtual prototyping system. *Comput Aided Des* 37:123-136
- Daloz P (2010) Concevoir les outils du bureau d'études: Dassault Systèmes, une firme innovante au service des concepteurs. (B. Weil & P. Le Masson, Interviewers) *Entreprises et histoire* 58:150-164
- Deschênes F, Ziou D, Fuchs P (2004) An unified approach for a simultaneous and cooperative estimation of defocus blur and spatial shifts. *Image Vis Comput* 22:35-57
- Dorta T, Perez E, Lesage A-M (2008) The ideation gap: hybrid tools, design flow and practice. *Des Stud* 29:121-141.
- Dyn N, Floater MS, Hormann K (2009) Four-point curve subdivision based on iterated chordal and centripetal parameterizations. *Comput Aided Geom Des* 26:279-286
- Farin G, Hoschek J, Kim MS (2002) Curves and surfaces for CAGD, fourth edition: a practical guide. North-Holland, Amsterdam
- Forty A (1992) Objects of desire. Thames & Hudson, London
- Fuchs P, Nashashibi F (1998) De la CAO à la réalité virtuelle. *Revue internationale de CFAO et d'informatique graphique* 13:131-167
- Gross MD, Do EYL (1996) Ambiguous intentions: a paper-like interface for creative design. In Proceedings of the 9th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, November 6-8, ACM, Seattle, WA, pp 183-192
- Igarashi T, Matsuoka S, Tanaka H (2007) Teddy: a sketching interface for 3D freeform design. In *ACM SIGGRAPH 2007*, August 5-9, ACM, New York, NY, p 21
- Kang Y, Kim H, Suzuki H, Han S (2013) Feature-based 3D CAD modeling on smart device using multi-touch gesture. *Int J CAD/CAM* 13:49-62

- Keefe DF, Feliz DA, Moscovich T, Laidlaw DH, LaViola Jr JJ (2001) CavePainting: a fully immersive 3D artistic medium and interactive experience. In Proceedings of the 2001 Symposium on Interactive 3D Graphics, March, ACM, New York, NY, pp 85-93
- Keller E (2012) Introducing ZBrush 3rd edition. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ
- Kelly JC, Maheut P, Petiot JF, Papalambros PY (2011) Incorporating user shape preference in engineering design optimisation. *J Eng Des* 22:627-650
- Kim J, Pratt MJ, Iyer RG, Sriram RD (2006) Standardized data exchange of CAD models with design intent. *Comput Aided Des* 40:760-777
- Kowalski MA, Markosian L, Northrup JD, Bourdev L, Barzel R, Holden LS, Hughes JF (1999) Art-based rendering of fur, grass, and trees. In Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, July, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, pp 433-438
- Lasram A, Lefebvre S, Damez C (2012) Procedural texture preview. *Comput Graph Forum* 31:413-420
- Lasram A, Lefebvre S (2012) Parallel patch-based texture synthesis. In Proceedings of the Fourth ACM SIGGRAPH/Eurographics Conference on High-Performance Graphics, June 23-25, Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, pp 115-124
- Le Masson P, Weil B (2010) La conception innovante comme mode d'extension et de régénération de la conception réglée: les expériences oubliées aux origines des bureaux d'études. *Entreprises et Histoire* 58:51-73
- Liu X, Dodds G, McCartney J, Hinds BK (2004) Virtual DesignWorks—designing 3D CAD models via haptic interaction. *Comput Aided Des* 36:1129-1140
- Loop C, Schaefer S (2008) Approximating Catmull-Clark subdivision surfaces with bicubic patches. *ACM Trans Graph* 27:8
- Loop C, Schaefer S, Ni T, Castaño I (2009) Approximating subdivision surfaces with Gregory patches for hardware tessellation. *ACM Trans Grap* 28:151
- Mandil G, Serré P, Mireille M, Desrochers A (2011) Geometrical tools for the description and control of functional specifications at the conceptual design phase. *IJODIR* 5(1)
- Mishkinis A, Gentil C, Lanquetin S, Sokolov D (2012) Approximate convex hull of affine iterated function system attractors. *Chaos Solitons Fractals* 45:1444-1451
- Nealen A, Igarashi T, Sorkine O, Alexa M (2007) FiberMesh: designing freeform surfaces with 3D curves. *ACM Trans Graph* 26:41
- Ouertani MZ, Băina S, Gzara L, Morel G (2011) Traceability and management of dispersed product knowledge during design and manufacturing. *Comput Aided Des* 43:546-562
- Robertson BF, Walther J, Radcliffe DF (2007) Creativity and the use of CAD tools: lessons for engineering design education from industry. *J Mech Des* 129:753-760
- Stergiopoulos P, Fuchs P, Laugeau C (2003) Design of a 2-finger hand exoskeleton for VR grasping simulation. Proceedings of Eurohaptics, July, Dublin, Ireland, pp 80-93
- Suh NP (2001) Axiomatic design: advances and applications (vol. 4). Oxford University Press, New York
- Sutherland IE (1964) Sketch pad a man-machine graphical communication system. In Proceedings of the SHARE Design Automation Workshop, January, ACM, New York, NY, pp 6.329-6.346
- Thurgood P, Clark J (2001) Use of 3D non-contact digitisation and 3D touch modelling systems within automotive seating design. In Proceedings of TCT Conference, Rapid News Publications, Chester, UK, pp 177-188

- Tovey M (1997) Styling and design: intuition and analysis in industrial design. *Des Stud* 18:5-31
- Tovey M (2002) Concept design CAD for the automotive industry. *J Eng Des* 13:5-18
- Umbaugh SE (2005) *Computer imaging: digital image analysis and processing*. CRC Press, Boca Raton, FL
- Weisberg D (2006) *The engineering design revolution — the people, companies and computer systems that changed forever the practice of engineering*. Cyon Research Corporation, Bethesda, MD
- Whited B, Daniels E, Kaschalk M, Osborne P, Odermatt K (2012) Computer-assisted animation of line and paint in Disney's Paperman. *SIGGRAPH Talks* 2012:19
- Zhang DH, Yan FX, Hou ZX, Kang WK (2009). Virtual clay modeling system with 6-DOF haptic feedback. *Mater Sci Forum* 628:155-160

Sixième partie

Conclusions

Chapitre 1

Résultats académiques

Le résultat préalable de cette thèse est la formulation d'un modèle inédit pour représenter les modes de raisonnement des designers industriels lors des processus de conception numérique. Nous avons montré qu'en analysant le processus sous une forme stratifiée avec trois différents niveaux de lecture, à savoir microscopique, mésoscopique et macroscopique, il était possible de transcender certaines fixations du modèle séquentiel qui est actuellement prépondérant au niveau industriel.

1.1 Des ateliers spécifiques de conception favorisent simultanément robustesse et générativité

Les outils de CAO qui y parviennent doivent alors disposer de propriétés particulières au niveau de leur interface ainsi que de leur modèleur géométrique. Le modèleur assure la compatibilité avec l'intégralité de la suite logicielle et propose aux concepteurs qui utilisent l'atelier une contrainte clairement identifiée sur laquelle travailler. Dans cette optique, les ateliers sont capables de fournir de l'«originalité acquise» de deux manières différentes. La première option est de contraindre le concepteur à manipuler uniquement des modèles qui posséderont tous la propriété relative à la contrainte. La seconde option requiert l'utilisation d'un algorithme qui, appliqué a posteriori de la conception, proposera une ensemble d'alternatives conformes à la contrainte en partant du concept initialement créé librement.

1.2 Les avatars dans le logiciel ne sont pas le résultat d'un raffinement progressif de l'objet

Les apparences sont trompeuses. Les représentations du produit en cours de conception sont en fait l'instanciation précise d'un algèbre de règles généré dans les ateliers de conception. Celui-ci est notamment sauvegardé sous la forme de l'arbre de conception ou encore au sein de la séquence des actions de conception conservées par l'ordinateur. Envisager différemment la nature de ce qui est conçu offre de nouvelles perspectives nouvelles pour les ateliers de conception numériques et les processus industriels qui les mobilisent.

1.3 Les designers industriels nécessitent des outils différents de ceux des artistes 3D et des ingénieurs

Les designers industriels mobilisent des raisonnements de conception spécifiques qui doivent être ciblés par des outils numériques dédiés. Un tel résultat induit également sur une meilleure caractérisation des activités des ingénieurs et des artistes 3D utilisant des outils numériques de conception. Ainsi, nous avons montré que les ingénieurs conçoivent des bases de règles valables pour des domaines variés afin d'atteindre une généricité maximale. En revanche, l'objectif poursuivi par les artistes 3D est radicalement différent. Ces derniers cherchent à concevoir des configurations uniques afin d'obtenir une singularité maximale. Les designers industriels, quant à eux, sont non seulement à mi-chemin entre ces deux catégories de professionnels, mais ils ont de plus la nécessité à créer des nouveaux modèles conceptuels. Leur logique de conception vise à obtenir de la singularité de masse.

Nous montrons également que les données générées par les outils de CAO sont d'une grande pertinence pour la recherche académique. La conception repose sur les outils numériques et ces derniers sauvegardent l'intégralité des manipulations des utilisateurs en plus de l'évolution précise des représentations avec lesquelles ils interagissent. Par l'intermédiaire de ce média, les chercheurs ont accès à une quantité phénoménale de connaissances relatives à la génération de concepts ainsi que leurs évolutions progressives. L'ensemble de ces données sont de plus recueillies sans biais par le système informatique, négligeant de fait une étape supplémentaire d'interprétation.

Le rapport entre créativité et contrainte est ainsi un moteur puissant d'intégration de profils professionnels capables d'apporter de l'innovation dans des processus industriels cadrés, séquencés et corsetés de toute part. L'exploitation et la mise en exergue de la contrainte comme source de créativité profitent à

tous types de concepteurs créatifs tels que les ingénieurs, les architectes, mais aussi les responsables marketing.

Enfin, les implications sont multiples pour les entreprises qui conçoivent ou emploient des outils numériques.

Chapitre 2

Les résultats et implications industriels

Pour chaque résultat académique, nous avons indiqué des solutions industrielles. Celles-ci décrivent des ateliers articulés autour d'une plateforme commune. Nous avons alors dressé le cahier des charges de cette plateforme afin d'assurer une performance optimisée.

Une telle plateforme doit être capable d'adresser des besoins de conception extrêmement variés. Elle est en effet en mesure d'accueillir des ateliers qui manipulent des données compatibles entre elles. Pour permettre l'innovation de rupture, les ateliers exposent clairement la contrainte dans un environnement dédié à son traitement ainsi que l'outil spécifique pour l'adresser. La plateforme comporte alors des ateliers communs pour réaliser des prescriptions croisées et des ateliers spécifiquement dédiés à des contraintes identifiées. La capacité de créer à la demande des nouveaux ateliers sur mesure pour des contraintes restant à découvrir est également cruciale. La plateforme commune autorisera une utilisation cohérente sur plusieurs supports matériels.

Ces résultats académiques sont également prometteurs pour les entreprises qui produisent des outils de CAO.

>Elles vont adresser davantage d'utilisateurs jusqu'à présent exclus des processus industriels et donc gagner de nouveaux clients. En ciblant l'ensemble des concepteurs, ces entreprises favoriseront également la diffusion des connaissances au sein d'une société industrielle ainsi que de son réseau.

>Elles vont avoir l'opportunité de développer des solutions de conception variables pour tous types de supports matériels (ordinateurs personnels, tablettes, smartphones et environnements immersifs) autorisant des interactions entre plusieurs utilisateurs grâce à la logique de la plateforme, de manière synchrone ou asynchrone. Le prototype que nous avons testé constitue justement une des «briques préliminaires» d'un environnement partagé pour effectuer des pres-

criptions croisées.

>Elles vont être capables de proposer à leurs clients de l'innovation à la demande. En fonction de la performance conceptrice recherchée, les outils s'adapteront afin d'offrir contrôle, rapidité, coût ou créativité à leurs utilisateurs.

Les outils du futur seront ainsi en mesure de proposer l'intégration de nouvelles contraintes et des moyens de gestion de celles-ci. De tels outils exploiteront alors comme ressources de conception de telles contraintes en les mettant en valeur et en offrant les outils pour les traiter. Ainsi, la capacité à intégrer des contraintes existantes et à en fabriquer de nouvelles risque fortement d'être la prochaine tendance des outils de CAO et du monde industriel.

Analogiquement, de telles évolutions impacteront les entreprises qui utilisent des outils de CAO et modifieront radicalement leurs méthodes et processus de conception ainsi que leurs organisations et méthodes.

Chapitre 3

Apport de la thèse sur le plan personnel

Ce travail doctoral fût l'occasion d'un enrichissement personnel important tant du point de vue technique que théorique tel que je me suis efforcé de laisser transparaître au sein de ce manuscrit. Mon parcours, à mi-chemin entre ingénieur et designer industriel m'avait déjà offert la capacité à appréhender des sujets de conception transversalement, en étant capable d'analyser par classe d'activités les problèmes qui m'étaient présentés. Cette thèse CIFRE a été l'occasion pour moi de poursuivre ce processus de transversalité en m'appropriant des méthodes de la recherche académique. Malgré une initiation lente, corrélée au challenge de simultanément assumer un rôle de salarié dans une grande entreprise industrielle et un rôle de chercheur au sein d'un laboratoire, j'ai su tirer profit de cette opportunité unique.

Le *CGS* est un lieu de grande stimulation intellectuelle. Les théories et les scientifiques que j'ai pu rencontrer m'ont initié à la recherche et ont développé en moi une forte appétence pour l'apprentissage et la découverte. Cette démarche m'a également aidé à étendre mes capacités de synthèse entre des domaines divers. La participation à diverses conférences internationales a été l'occasion de côtoyer des sommités intellectuelles de la communauté du design industriel et, par là même, à profiter de leur expérience. Enfin la rédaction d'articles scientifique m'a inculqué la rigueur ainsi que le souci de l'emploi d'une syntaxe et d'un vocabulaire précis.

De plus, *Dassault Systèmes* a été le lieu idéal pour mener ces travaux de recherche. J'ai eu la chance d'être accueilli simultanément au sein de deux équipes. D'un côté la User Experience, qui se concentre sur la plateforme générale des outils de conception dont CATIA est l'une des figures de proue de l'entreprise. D'un autre côté, le Design Studio, est le lieu de prescription et de conception des ateliers pour les designers industriels. J'ai non seulement participé à leurs

travaux respectifs en tant observateur, mais aussi activement en analysant chacun de leurs usages. Enfin au cours de ces quatre années, j'ai pu côtoyer de très nombreux collègues qui connaissent très bien l'histoire de la société et de ses produits, ainsi que les technologies qu'elle mobilise. Les résultats de cette thèse CIFRE directement assimilables par Dassault Systèmes sont multiples et variés : concepts, prototypes, brevets, scenario utilisateur, guidelines pour interfaces immersives, recommandations et stratégie de mise en œuvre d'outils créatifs et diffusion de connaissances.

Suite à une telle expérience, je suis ainsi aujourd'hui capable d'interagir avec un éventail très large de profils professionnels dans le champ d'application des outils de conception et des interfaces immersives, un domaine qui est régulièrement cité comme un des plus prometteurs pour les prochaines années.

Chapitre 4

Remerciements

Après 3 ans et demi de travail mon travail doctoral touche à sa fin. Les derniers mois sont pour moi non seulement le moment de la synthèse et de l'écriture, mais aussi l'occasion de revenir sur un parcours souvent chaotique et sinueux, entrecoupé par des moments de grâce.

Lors de ces pérégrinations ne pas se perdre relève de la gageure et la découverte de nouvelles connaissances affriolantes peut parfois se révéler un piège. Il faut savoir laisser tomber le chatoyant pour viser l'efficace et parvenir à l'essentiel. Pour surmonter tous ces obstacles j'ai eu la chance de pouvoir compter sur mes collègues, amis et famille.

Je tiens à remercier Pascal et Benoit pour leurs conseils et accompagnement. Je remercie tous les chercheurs et doctorants qui m'ont assisté : Akin, Aurélie, Elvira, Frédéric G, Jeanne, Kenza, Kevin, Lucie, Marine, Olga K, Olga L, Rochdi, Shenle et Sophie. Je n'oublie pas non plus Céline, Martine et Stéphanie qui furent d'une aide précieuse.

Anne pour son enthousiasme à réaliser cette thèse malgré les nombreux obstacles rencontrés lors de la mise en place du sujet. Patrick pour sa supervision régulière et son intérêt pour mes travaux. Sébastien et Hubert pour leur encadrement chez Dassault Systèmes. L'équipe du Design Studio qui m'a côtoyé tous les jours et grandement aidé dans mon travail : Agathe, Anne-Sophie, Claudia, Charles, Franck, Jean, Jonathan, Lionel, Marie, Nicolas, Sébastien, Ségolène et Thibault. Mes collègues de CATIA : Frédéric, Laura, Mathieu et Pierre. Mes collègues de la User Experience : Duy-Minh, Fanny et Mickaël. Enfin mes collègues de 3Dvia et de IT : Charles, David, Geoffrey et Nicolas. Benjamin, Jean, Jean-Paul et Yannick pour la grande qualité de leur travail et les bons moments passés dans le Lives.

Je remercie mes amis qui m'ont accompagné et conseillé dans cette entreprise : Fabien, Jérôme, Martin, Nicolas, et tous les nombreux autres.

Je suis à peu près certain d'avoir oublié de grands contributeurs à ces der-

nières années, ces lignes leur sont donc dédiées.

Je remercie ma famille et belle famille qui m'a soutenu dans tous les instants : ma sœur, mes parents, mes grands-parents et Dominique. Je remercie enfin tout particulièrement ma femme, Elsa, pour son soutien, son aide irremplaçable et surtout sa grande abnégation face à mon caractère parfois difficile. La qualité de mon travail a grandement été améliorée par son concours.

Septième partie

Annexe

Article 4 : Requirements for effective industrial design software : retracing historical evolution of CAD tools for enabling better design integration

Arrighi Pierre-Antoine, Akin Kazakci
CGS Mines ParisTech

Papier soumis à la revue Design Studies et présenté à ICED 2013.

Requirements for effective industrial design software: retracing historical evolution of CAD tools for enabling better design integration

Arrighi Pierre-Antoine, Akin Osman Kazakçı

CGS Mines ParisTech 60 boulevard Saint-Michel 75272 PARIS Cedex 06

Abstract: Despite their important role in the design cycle, industrial designers still struggle today to be fully integrated with other design professions within corporate settings. This paper identifies the lack of adapted software tools as an obstacle to the integration. Lacking their own dedicated tools, industrial designers are pushed to make use of tools built for other professions. Taking the issue as a design problem, we proceed to a historical review of currently used engineering design and 3D art software in order to reveal and understand their underlying design rationale. The analysis reveals major functional requirements and broad design parameters embedded in these tools. By reviewing the genesis of industrial design as a profession, we demonstrate the incompatibility between industrial designer's needs and the functionalities provided by those tools. This historical analysis through a design perspective enables the elicitation of several functional requirements and design parameters for future industrial design software - hopefully, contributing to more effective tools and a better integration of industrial design in corporate design processes.

Keywords: design tools, industrial design, software design, design rationale

1. Introduction

Industrial companies make most of their profits with products less than three years old. A major consequence of this intensive rhythm for innovation is the need for a sustained capacity for generating novelty, either by constant renewal of existing products or by the creation of new ones (Le Masson, Weil, & Hatchuel, 2006). A number of studies indicate that industrial design is key to trigger, foster and sustain innovation in such contexts (Borja De Mozota, 2002; Verganti, 2008). Berkowitz (1987) argues that industrial design contributes to the firms performance in a measurable way.

Yet, industrial designers are still considered today as misunderstood and mysterious (Smith, 2005). Industrial design has always been difficult to integrate into the mainstream engineering design processes since the birth of the profession (Loewy, 1963). Collaboration with other design professions (e.g., engineers and product managers) appears to be impeded by strong differences in design languages (Von Stamm, 2008; Goffin, Micheli, Jaina, & Verganti, 2011; Goffin, Baxter, & Schoeman, 2011). The means and ends industrial designers use to achieve a good design and the type of innovation they target are also very different with respect to other design professions (Rampino, 2011).

For a full integration of industrial design profession into the global industrial design process, an additional level of difficulty is imposed by the *tools* they use. Industrial designers, after decades of existence as a profession, still do not have dedicated digital tools supporting their activities: they are expected to make use of tools invented and tailored for engineers or graphical artists.

Two major kinds of reasons can be discerned for this discrepancy. On the one hand, industrial designers remain attached to express themselves through the traditional media issued from their artistic education (such as sketch or mockups) – which are hard to integrate into the work routines of design engineers. On the other hand, attempts to produce the digital counter parts of these traditional media, such as the 3D sketching; (Bae, Balakrishnan, & Singh, 2008) or digital clay (ref: Tovey 2012), have been hindered by a major flaw: the models they generate are not compatible with most of the engineering design software.

Furthermore, forcing a transition of these models to the engineering software suites creates what has been called a *design-gap* (Dorta, Perez, & Lesage, 2008): the concepts created by industrial designers are modified beyond their control. If they try to by-pass this issue by using tools created for engineering design, they confront the even more delicate issue of losing their creative touch - since those tools have not been designed for creativity or industrial design concerns such as the aesthetics. Hence, there is a conundrum that industrial design professionals face on a daily basis: in most cases, either they need to borrow and work with tools not specifically tailored for them – loosing the flexibility and properties of the digital media they produce, or, to use tools adapted to their needs but whose outputs cannot be integrated into the downstream design process.

Considering the necessity to better articulate engineering design and industrial design professions within companies, these are significant obstacles. Among a myriad of dimensions (e.g. organizational changes) that can be envisaged to tackle this issue, the current paper suggests the integration of digital tools sets of both professions as an important enabler for better integration of industrial and engineering design professions and practices. Interestingly, there is no research on the role and impact of these tools on the organization and practice of design, despite the established fact that tools used in a company shape significantly its identity, strategy and performances (Moisdon, 1997).

Given these imperatives, the current paper sets out to shed light on how industrial designers came to the conundrum they struggle with today. We approach this question by analyzing the design rationale behind the major classes of tools used by designers today. Namely, we consider engineering CAD tools and 3D graphical art tools and we analyze reasons that hinder a sound relationship and integration of industrial design specific tools within the existing toolset. We take the point of view that design research can actively contribute to the *design of design tools*. As far as we were able to determine, no single work has ever considered the issue of design of design tools as a broader issue and tried to explicit major design orientations already in place.

Beyond the quasi-strict separation among the literatures dealing with engineering design tools and 3D art tools – reducing thus chances of a healthy interaction, the literature about CAD tools is too much focused on technical aspects (e.g. modeling kernel or interface issues; see for examples, (Stergiopoulos, 2003; Dyn, 2009 ; Mandil, 2011 ; Bodein, 2012). In contrast, the current paper treats this question as a *design problem* and suggests an analysis to reveal the somewhat obscure *design rationale* behind design tools constituted over the course of decades of technical efforts. Accordingly, we approach the problem with a review of the historical evolution (Bozdoc, 1999, 2003; Farin et al., 2002) of design tools. Beyond providing a starting point to researchers interested in design tools and their effects in design practice, the historical approach reveals several findings regarding the major elements and events that shaped the design rationale underlying current tools and technologies.

One of the findings is that, in both cases, the design of tools has been shaped by historically significant projects that have been the turning point in the corresponding profession. Needs and requirements created by those projects, highlighting important evolutions in the corresponding profession is responded – sooner or later – with a

technical breakthrough (e.g. the need to better control the creation of a shape by CNC machines drove the invention of Bézier curves). Thus, the evolution of design tools was inextricably linked to the evolution of the corresponding design professions. Our historical analysis also shows that industrial designers who had difficulty in abandoning traditional physical tools such as mockups were naturally pushed to adopt existing tools (built for the engineer or 3D artist) when they did so. Based on the historical account provided, the present work dresses a comparison of major functional requirements and design parameters for tools in engineering design, industrial design and 3D art – in order to clarify their relationships and to suggest requirements and potential design parameters for future industrial design tools.

Section 2 gives further elements about the research gap, hypotheses and methodology followed. Section 3 presents a review of the evolution of engineering design tools, emphasizing main events and technologies. Section 3 reviews the evolution of graphical 3D art tools following the same approach. Section 4, briefly introduces and discusses the origins of industrial design as a profession, the problems caused by the lack of integration in the overall design processes and formulates a list of broad requirements for adapted tools, based on the discussion so far. Finally, we conclude in section 5.

2. Research question and methodology

2.1 Research gap: a need for understanding design rationale embedded in design tools

The challenge to make simple modifications to existing families of CAD tools to fit the needs of industrial design appears to be impossible , after years of countless tentatives (Tovey, 1997 ; Tovey, 2002), (Xue, 2005 ; Dorta, 2008), (Bae, 2008) no solution was successfully integrated inside industrial CAD suites.. On the one hand, it is very difficult to make CAD engineering tools more able to handle levels of detail required by industrial design process and to adopt more natural interfaces. On the other hand, modifying 3D art tools, such as 3DMax® or Zbrush®, in order to bestow them with the capacity to deal with the parametric generalization and standardization would change their deep nature and seriously alter their performance without making them capable of producing manufacturable compatible models.

Our hypothesis is that industrial design practice requires their own specific CAD tools with a proper design rationale specific to their activities and such a requirement cannot be satisfied with simple extensions of tools made for other professionals. This induces a need to model and understand the design rationale embedded in the existing tools and the dynamics of industrial designers.

The report of mismatch between industrial design practice and the widely disseminated tools was remarked by Tovey (1997). He explains precisely what are the differences between the needs of industrial design and their engineering design colleagues. According to him, industrials have two great area of responsibility:

1. To represent the market and user requirements in determining the ergonomics and appearance of the product.
2. To integrate market, user and engineering requirements into a whole design solution.

This can be understood as a dual need, on one hand to have tools for working on the aesthetical properties of products and the meaning of it (as artists do), while at the same time being integrated inside the industrial firms and therefore working with 3D models intended to be used for manufacturing products (as engineers do). The author makes a list of the processes that industrial designers use and states that the current tools are

unsatisfying for those needs, by their functions, the type of objects they can handle, their interfaces and appearances. He finally proposes some direction for a renewed family of tools based on sketching and clay modeling techniques transposed to CAD environments.

In 2002, Tovey (2002) proposed a hybrid technique combining conventional sketches, sketch mapping, sketch modeling and non-contact scanning techniques. The designer can generate a 3D mesh that has roughly the shape of the product intended on their sketches. This pre-supposes the use particular sketches, such as face, bottom, up and sides to do so. It then maps the sketches on the surface. It is a type of reverse rendering technique. Tovey argues that this hybrid technique retains the speed and informality of sketch and sketch modeling by craft processes.

A similar attempt can be found, such as in the work of Bae and colleagues (2008) who proposed a software called ILoveSketch®. This tool allows the industrial designer to express herself with glyphs and pen-paper metaphors. With their system, trained designers can draw detailed 3D models by using a succession of planes creation techniques and line drawings. The prototype was optimized for being used with graphic tablets. We can characterize this project as a tentative to bring a form of the traditional sketching into the virtual environment.

Another trend found in the literature is the use the immersive interfaces to propose functionalities reminiscent of clay modeling (see e.g. Thurgood, 2001, and references therein). The system relies on non-contact digitizing, reverse engineering and 3D touch modeling. Yet, it proves that transferring from CAD model to another type of data, requires intensive exports and breaking the link between the source file (where the design tree and all the design features are stored) in order to obtain what is called a “dead skin”. Another model conversion will be required if the designed prototype is to be validated.

It can be observed that these propositions tend to give back to the designer her traditional media, such as sketches and clay models, within a digital environment. Although promising applications have been proposed, they severely lack integration with manufacturing processes and product lifecycle management features. The models they generate can only be integrated inside industrial environments after conversions of data that comes with heavy losses of information (Thurgood, 2001). These data conversions have been called design-gap (Tovey, 2002; Dorta, 2008) in the literature. A major side effect of this design gap is that, after more than two decades of attempts, no single software became a tool that have been used by industrial designers on a daily basis.

2.2. Methodology

A major obstacle in understanding, comparing and aligning different types of CAD tools is the over-emphasis in the literature on purely technical aspects of the tools such as the modeler or the interfaces (Dori, 1995 ; Stergiopoulos, 2003 ; Dyn, 2009 ; Mandil, 2011 ; Bodein, 2012 ; Dorta, 2008 ; Arrighi, 2012). For understanding the design rationale of current CAD tools, a description of those based solely on a given technical aspects is not enough. In order to characterize the needs for suitable industrial design tools, we need to consider the particularities of the design activities within which they are used and their relationship with existing toolsets.

The present work treats this issue as a *design problem* and elaborates a study of the design orientations taken so far. The primary component of our methodology is a review of the historical evolution of design tools (Bozdoc, 1999, 2003; Farin et al., 2002). This historical perspective assesses how the precursors of today's cutting edge software appeared and explain why they were engineered this way and for what purposes. Since our aim is reveal the *design rationale* behind the widely used design tools, a second component of our methodology is to make use of some ideas developed within design

research. Namely, we structure our historical review by pinpointing (sometimes without explicitly saying so) functional requirements and design parameters (Suh, 2001) discerned from that evolution. To the best of our knowledge, this is a unique feature specific to our work, not used in previous work in the analysis of design tools. From a broader perspective, such retrospective analysis through Suh's model or other general design theories is rare in the literature but an approach commonly used in the work developed in Mines Paristech (Kazakci and LeMasson, 2012).

3. Evolution of engineering practices and repercussions for engineering design tools

In the following, we will start with explanations about how the engineers were able to manufacture their own digital tools, with a perfect fit to their daily design tasks. The functionalities of engineers' design tools were directly influenced, if not imposed, by the industrial challenges they dealt with.

3.1 Pre-computer era: Reusability and speed already as fundamental needs for engineering design

The first recorded use of curves for manufacturing intend was in early Roman times for the purpose of shipbuilding. The designers used templates and full size drawings on the ground to produce ship's ribs, thus a vessel's basic geometry could be *stored* and did not have to be recreated every time. Even back then, the reusability of designs was essential and the principal goal. This early form of "parametric design", the origins of which can be traced back to the *Elements* of Euclid as early as 300 BC, was later perfected by the Venetian naval industry. Venetians were able to produce series of ship from the same reference at previously unachieved speed and reliability (Lane, 1992).

Same issues and concerns were preserved through out design history. Early design theories such Redtenbacher (1848) had the ambition to teach craftsmen and engineers how to produce efficient and standardized machine designs. The method pre-supposed the machine architecture is known and the design effort is about the dimensioning of the different parts, based on a maximal reuse of knowledge. One of the most influential design companies in early 20th century, the Boulton Locomotive Works (Le masson et al.) were using also a parametric design approach facilitating reuse of previous design episodes. Once the parameters calculated and known the designers had to build instructions for the downstream manufacturing. Their prescription media was mainly blueprints that were drawn and then transmitted to the factory.

Fifty years latter this method of mass design was dominant in the industry and with the generalization of mass production at the beginning of the 20th century in the industry, mostly under the impulse of Ford in the newly born automotive sector, for the reusability of an increasingly complex knowledge, the choice of design tools became even more critical. The designers, draftsmen and engineers, were conceiving the blueprints and plans with pen and papers. This technique was extremely long, lacked reusability and was source of errors. Then it is not surprising that the promise to surpass all these flaws simultaneously with computer programs seems like a holy grail for these firms after almost 50 years of difficulties, from 1900 to 1950. It is very interesting to note that the impulse did not come from the designing side but rather the manufacturing one.

3.1.1 Design for manufacturing: the first impetus towards computer aided design

A major shift occurred in design practices by the apparition of CNC (computer numerical control) machines that provoked dramatic changes in engineering design practice. The first industries that can afford such technologies, very expensive by then, were the automotive and aircraft industries, albeit their priorities were different (Scranton, 2010).

The automotive industry, dominated at this time by the *Big Three* (Ford, GM and Chrysler), was looking for a simpler way to produce CNC machine instructions for the milling of various shapes. The early models of CNC machine were fed with punched tape and their users had great difficulties determining the right trajectories of the milling tools. With the progressive apparition of programmable and faster units this issue became very stringent. The initial main use of computers was indeed not to compute complex shapes but simply to produce the information necessary to drive milling machines. A lot of tentative have been made to come up with tools to help the engineers to draw the trajectories instead of sampling and defining all the points through which the tool needed to pass. While techniques such as the *Lagrangian interpolation* failed early on, new blueprint-to-computer concepts were needed.

During the 50's, Gordon (Gordon, 1971) and De Boor (De Boor, 1974) working for GM proposed their own solution and so did Ferguson (1964) at Boeing. These in-house solutions did not last and were soon replaced by solutions coming from other side of the Atlantic. Pierre Bézier, a French engineer working for Renault, introduced a most ingenious technique for defining curves. Instead of defining a curve through its points, he proposed to use control points placed on the tangent lines, which allowed both a better drawing experience and an easier control for adjustments (Bézier 1962).

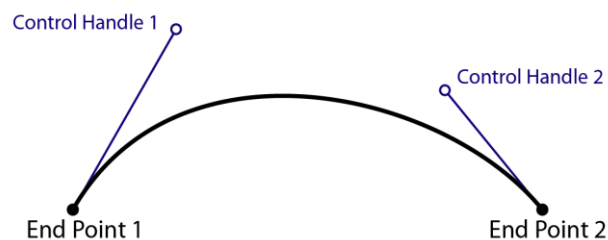


Figure 1. A simple Bézier curve

In its most basic form, a Bézier curve is made up of two end points and control handles attached to each node. The control handles define the shape of the curve on either side of the common node. The breakthrough insight was to use *control polygon*, a technique that was never used before. Instead of changing the curve (or surface) directly, one changes the control polygon, and the curve (or surface) follows in a very intuitive way. This technique of drawing is still in use in most of the design software either in 2D or 3D environments. Based on this technique, Bézier designed the software UNISURF that was the precursor of most of the CAD (computer-aided design)/CAM (computer-aided manufacture) software still in use today (Bezier 1986).

The aircraft industry had different requirements even if they ultimately also needed to manufacture parts using CNC machines. During the post World War II context, a technology boom occurred: because this domain was using specialized, cutting-edge technology for the development of high-speed and high-altitude aircrafts, they needed adapted tools. Their flexibility was then critical, for devices and components to be redesigned after failures in testing or use mandated serial adjustments in materials, processing and machining setups.

They had the constant need of revising and reusing blueprints that the paper made very cumbersome (Farin, Hoschek, & Kim, 2002). They also had the need to produce a *large variety* of representation of their assembly, sometimes in full scale, which is rather quite different with respect to automobile industry. For instance producing a new view of a complex wireframe object from existing views would take a draftsman a week or more. Computers could generate this in only seconds, so they became increasingly needed. This necessity to represent and manage digitally complex blueprints explains why aircraft builders, such as Lockheed Martin, developed their own CAD solutions. The project began in 1965 under the name “Project Design” and was implemented on IBM 360 computers (Weisberg, 2006).

The software were designed to integrate parametric manipulation of shapes were each objects such as *lines, points, circles* was parameterized and then applied functions such as *offset* and *dimensions* for the most basics. With this functionality design changes were easier to integrate. This software, with significant historical importance for CAD tools, was called CADAM (Computer-graphics Augmented Design And Manufacturing). Some functions were parameterized and stored under the appearance of a design tree, some not. The decisions were arbitrarily taken by the designers over usage assumptions and technical complexity. When users needed more features they were simply added if possible. This software was even used for the production of electric diagrams, aircraft carpets with an unseen precision.

3.1.2 The apparition of new hardware generates new software capacities

In Lockheed Martin’s CADAM, IBM’s 2250 graphics display terminals were used. On these terminals a light-pen as a pointing device which allowed a very intuitive and easy way to interact with computer diagrams (Weisberg, 2006). This interface technique is based on the work of (Sutherland, 1963) and makes easy the selection of displayed entities. The user could directly select and trace entities rather than requiring the computer to indirectly match a coordinate input from a tablet device to the drawing database. CADAM also complemented the light-pen with a 32-button programmable function box (which can be seen at the left of the operator) and on-screen menus to initiate graphic actions.

A fully functional 2250 Model I with line generator, keyboard, function keypad and 8KB memory sold for over \$100,000 in 1974. Eventually, the use of light-pens has been abandoned in favor of a much cheaper and more precise way to interact with displayed graphics: the mouse (English, Engelbart, 1965 ; English, Engelbart, & Berman, 1967). The engineer, who needed more precision for an acceptable cost adopted this new technology, while, industrial designer was still clinging to sketching pen and physical prototypes, an opportunity to integrate both worlds has been lost.

3.2 From 2D to 3D software: minimizing the need for mock-ups

In 1974, the company Dassault Aviation was one of the first licensees of Lockheed’s CADAM software that was used for two-dimensional drafting work. In 1976, Dassault Aviation acquired the UNISURF tool from Renault in-house use to complement its CADAM system. 3D modeling became necessary for the design and assembly of plane wings where it was necessary to have precision at the level of microns on parts that were sometimes bigger than dozens of meters. Very complex shapes and parts of big size with very little geometric tolerance are very hard to manage to assemble with 2D blueprints. A mock-up or prototype was still necessary at this time.



Figure 2. IBM 2250 Display connected to an IBM 1130 Computer

In 1978, Jean Cabrière, Dassault Aviation's managing director, called for the development of a three-dimensional in-house design tool, to resolve these issues. The company developed its software starting on the core of CADAM and created a module called CATIA (Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application). This was possible because Lockheed provided source code to its customers enabling them to make changes to the software. It also inherited a lot from UNISURF and was at first focused on the management of compositions and tolerances, making a link between digital data documents and the manufacturing factory. In 1981, CATIA Version 1 was finally announced as an add-on product for 3D design, surface modeling and NC programming (Daloz, 2010) and predominantly sold by IBM that saw an opportunity to sell more very expensive computers.

Used both modeling applications and the machining of surface geometry CATIA made it possible to reduce cycle times, improve quality and optimize production efficiencies. It required at its beginnings about four times the computational power of CADAM and also an alphanumeric display in addition to the graphics display used for CADAM. At this time models were represented with wireframes due to the display technology of screen (vector tracing) and the visualization only seen as an extra, the core being to produce manufacturing data. This capacity to represent objects in 3D eventually pushed the physical mockup out of the picture: in 1990 Boeing started designing its new 777 only on computer, going fully digital (Daloz, 2010).

4. Digital tools for 3D artists

This category of tools has its roots in two academic fields of literature that merged latter on. Historically, the field of image processing grew from electrical engineering as an extension of signal processing branch, while the computer science discipline was largely responsible for developments in computer vision (Umbaugh, S.E., 2005).

4.1 The first digital images and 2D Software tradition

The first digital photograph was made of just 176 x 176 pixels and presented by a team directed by Russell A. Kirsch in 1957. They used the computer to extract line drawings, count objects, recognize types of characters and display digital images on an oscilloscope screen. This breakthrough can be seen as the forerunner of all subsequent computer imaging, and recognizing the importance of this first digital photograph, Life magazine in 2003 credited this image as one of the "100 Photographs That Changed the World". This

was a milestone because it was the first time the computer is used for displaying a graphic content.

The tradition of digital imaging gave birth to a lot of 2D illustrative software that are still widely used today for graphical illustration. A lot of their illustrative and graphic work is still done in 2D. The most widely disseminated creative suite are the ones from Adobe, with Photoshop and Illustrator. Photoshop was at first dedicated for digital images editing but it is now widely use for the creation of digital content with its drawing capacities and the possibility to interface it with graphic tablets with stylus. It is important to note that the inventor of Photoshop was Thomas Knoll, a PhD Student in computer science whose brother was John Knoll, an Industrial Light & Magic employee. His brother played a key role by encouraging him to sell this product. Illustrator was at first a font editor but its vector graphics editor capacities made it soon the reference for drawing with vectors. It heavily relies on Bézier curves for the drawing of shapes and curves. The Bézier curves can be controlled with anchor points and bars and with a minimal requirement of 4 points (2 end points and 2 control points) this method allows the user to precisely draw and modify curves. What was once a drawing technique for milling tools is now widely use for the generation of artistic graphics.

4.2 Interactive graphism: a common ancestor with engineering tools, SketchPad

Displaying was one step; the other one was the capacity to interact with the computer more naturally than with the input of code and command lines. The work of Ivan Sutherland who in 1960 used a TX-2 computer produced at MIT's Lincoln Laboratory to create a project called SKETCHPAD, which is considered the first step of drawing interface. Even if its prototype worked with a light-pen at this time its principles have legacy in every WIMP (Windows Icons Menus Pointers, the term is coined by in 1980 by Wilberts (Nesheim, E. 2011) interfaces.

4.3 The strong influence of the entertainment industry for the 3D software

4.3.1 First wireframe representations for the entertainment

With these two bases we have to wait until the late 70s to see the first commercial applications of this type of products. This can be partially explained by the fast price decrease of the computers and their increasing processing capacities, as Moore prophesized (Schaller 1997). This enables the apparition of the personal computer and the number of users and fields of applications sprouted in every direction. Magazines such as ANALOG (Atari Newsletter And Lots Of Games) published and line codes shared among various communities in the early 1980's.

Computer graphics were used to create 3D wireframes in the domain of entertainment. These hi-tech special effects gave the movies very high science fictional or futuristic images. This was a need pushed by the film and series making industries and the science fiction. A lot of TV series such as Galactica and Star Trek required the intensive use of computer generated imagery effects. The movie Star wars Episode IV: A New Hope also participated to the need to create structure capable of developing such technologies. It caused Lucas to found the Industry Of Light And Magic. This company is responsible for the special effects of most of the Hollywood super-production primed for their special effects such as Star Wars (1977-2005), Back To The Future (1985-1990), Terminator: The Judgement Day (1991) and Jurassic Park (1993).

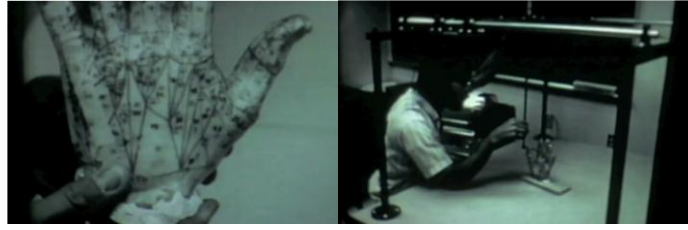


Figure 3. (a) Polygons drawn over a hand mock up for 3D registering of defining dots; (b) Digitalization of the hand with a 3D pointer which records all 3 coordinates.

4.3.2 Polygonal modeling: a basis for virtual artistic realizations

The wireframe was a first step needed for the representation of 3D objects but in only specified the contours and made images with distant looks as we see things in reality, surfaces that absorbs, transmits or reflect light. Once the computers became powerful enough to generate dynamic 3D models in wireframes they quickly gained the capacity to process what is called surface models. The polygons could be built and defined with wireframes and are the most basic surfaces possible they therefore offered a very practical mean to define a 3D surface. A polygon is composed of triangles characterized by 3 dots in the space, 3 edges linking them and an orientated surface. They have several advantages:

- The polygons are very easily defined and the operators for modifying them rely on simple metaphors such as displacement and scale. When a user models an object he has to position the polygons but he does not have the imperative to know how to construct the object and manipulate dedicated design functions such as in the case of engineering digital design tools. The polygons are a very scalable material that means that with practically no cost a model can be refined simply by adding more subdivisions to the polygons (they become smaller). Bigger number of polygons enables a higher resolution. Along with the power increase of computers, the generated models were made of an increasing number of polygons. At the beginning of the art polygons were also a very efficient way for scanning 3D real objects. The mockups were made of polygons and the user had a way of registering one by one each coordinate of each dot and line composing them.
- This modeling technique made easier the possibilities of animation and deformation of geometries. The deformation of polygons becomes easy to handle, as it is only a displacement of the dots defining them. As the dots are move into the space by commands, key frames are stored. The software calculates the deformation between the starting and ending point.
- The polygons are ideal for calculating the lighting of objects. The software can simply calculate the reflection angles given by each polygonal surface. The rendering, i.e the aspect of display, of each surface is calculated by the computer according to lighting conditions, the material and colors of the polygon, etc... The final rendering is the sum of all reflections of all the polygons composing the surface. Finally, this process is automated on graphic cards that decompose (tessellate) every surface to create the display of 3D models. Tessellation is the way computers graphic cards decompose the images before displaying it on a screen (nowadays with a pixel rendering). With a direct control on the polygons the artists could easily control their surfaces and their reflection before the final optimized rendering because they had the access to what the surface would be made of. They are also use for the skinning operation when the artists need to position a texture on geometry. He starts by unfolding it and then he defines on the 2D surface decomposed in polygons exactly where the texture is positioned.

4.3.3 Subdivision technique: making smooth polygons

This technique was first born when the artist G. Chaikin presented in 1974 at the CAGD conference a technique to obtain smooth curves from closed polygons, and using a process of continual “chopping of corners” (Chaikin, 1974). Ed Catmull introduced with John Clark of the subdivision technique: they built an algorithm to uniform cubic B-spline curves and its tensor product counterpart (Catmull & Clark, 1978) from the work of the artist.

Tensor-product surfaces can be constructed from any two types of univariate blending functions. If the univariate blending functions are Bernstein polynomials, the surface is a Bézier surface patch. If the blending functions are B-Splines, the surface is a NURBS surface (Sederberg, 2011). With this technique it is possible to manipulate polygonal meshes and to transform them into smooth surfaces. This process is used in almost every 3D software in this category and more and more in some engineering CAD software (such as CATIA, which patented the technique in one of its product in 2005).

This novelty is significant for 3D artists and industrial designers alike. It offers them the possibility to refine their geometric designs with polygons they could entirely edit to their will and *then* apply the smoothing options. The smoothing could be more or less iterated providing a satisfying processor and graphical use when preparing the model and then be pushed to the max to obtain nice and smoothed surfaces for rendering. The number of smoothing iteration is therefore a very important option and an essential parameter to control for the 3D art and industrial designers.



Figure 4. In 1972 Ed Catmull (founder of Pixar) and his colleagues created the world's first 3D rendered movie, an animated version of Ed's left hand.

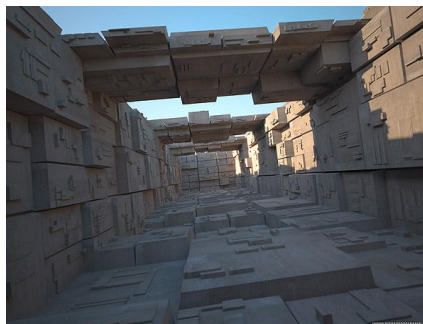


Figure 5. An image created using Tom Hudson's Greeble plugin by Canadian artist and Greeblelicious founder Richard Rosenman

4.3.4 Birth of 3D software suites

With the rise of techniques suiting the needs of 3D artists new software suites emerged. These needs were the ability to model 3D objects with a full control over their appearance and to deform them for still images renderings and animate them dynamically for movies. They were perfectly fitted by the polygonal and subdivision techniques that were developed for this purpose.

Engineering Design			Artistic Design			Industrial Design		
FR	DP		FR	DP		FR	DP	
2000 BC	Reuse, speed, flexibility	Template based logic						
1850	Produce parts with specified properties	2D blueprints and technical drawings						
1950	Produce parts with CNC machines => define trajectories of milling machines	Draw curves efficiently => Bezier curves				1900	Capacity to prescribe the general aspect of a future product before it actually exists	Clay modeling and sketching
1960	Interact with graphic content	Light pen system by Sutherland	1950	use computing power for imagery analysis	First digital image	1950	Produce original models with a great density of details	Tools capable of modeling with a huge density of details => Clay modeling and sketching
1960	Interact with graphic content with cheap and productive hardware	Mouse						
1970	Management of tolerance and obtain a design robust to frequent revisions	Parametric modelling	1970	Generate futuristic effects for SF movies and series	Wireframe representation productions			
1970	Compute and simulate physical constraints	Finite element method (FEM)						
1980	Design complex shapes and assemblies	3D CAD tools	1980	Manage and produce 2D graphical content	Use pixel modifications => Photoshop			
			1980	Manage and produce 2D fonts and graphical content => Illustrator	Use vector representations			
			1980	Generate realistic virtual objects	Polygonal modeling			
			1980	Manage animations of virtual objects	Polygonal modeling			
			1980	Manage rendering and lighting of virtual objects	Polygonal modeling	1980	Re-usability and re-adaptability of previous designs	Store all design operations. Design tree for example.
			1980	Generate realistic virtual objects and smooth polygons	Subdivision technique		Conversion of data formats without losses	Geometric modeler able to handle a large variety of data and to do lossless conversions
1990	Manage large quantities of data	Paperless design, PLM/PDM	2000	Manage 3D models with a very high density of details	Pixels modeling		Represent surfaces with high degree of quality for manufacturing	Use vector based representations which do not suffer fixed sampling
			2005	Capacity to generate a large variety of materials	Procedural textures and rendering effects	2000	Capacity to integrate user feedbacks and emotions	Kansel design techniques
							Represent arbitrary complex shapes	Subdivision surfaces made of NURBS
							Interfaces that allow direct manipulation of designed objects	Manipulation cage
							Being able to realize modifications that need to be propagated only locally	Manipulation cage
2010	From product creation to delivering experiences	Introduce tools able to deliver experiences at early design stages, possible with fast prototyping / 3D	2010	Capacity to reuse standard behaviors (crowds, walking, etc...)	Libraries of animation and expressions	2010	Create 3D experience environments so the future user can evaluate product before it is produced	Lighting tools and animation tools Virtual and Augmented reality

Figure 6. The evolution of functional requirements and design parameters for each category of CAD tools. The color code indicates correspondences and intersections.

The first version of 3DStudio with its low cost, versatile functionality, and expandability via its plugin architecture would make it the most widely used 3D software in the world. It was the first Autodesk® full 3D animation software and is a concatenation of several different modules for creating, editing, animating and rendering 3D models with the polygonal and subdivision methods. Its inventors, Gary Yost and Tom Hudson were deeply inspired by the science-fiction special effects they witnesses and with the possibility to buy cheap computers in the late 80's they were able to develop the software.

5. Impact of engineering and 3D art tools on industrial design practices

Along with engineers and 3D artists, another profession in need of digital design tools is the industrial designers. We shall now review the origins of industrial design as a profession, the problems caused by the lack of integration in the overall design processes and formulates a list of broad requirements for adapted tools, based on the discussion so far.

5.1 Industrial design: an overview of a recent design profession

Forty (1992) explains the appearance of industrial design in the beginning of the 19th century; in an industrial revolution era in Great Britain, the design process started to drastically change. Instead of craftsmen working alone and designing unique objects, an industrial organization appeared with managers and a working class. For manufacturing serial production, the newly born companies needed to design their products, first by copying older products (e.g. the Portland Vase of Wedgwood) and following the tendencies (e.g. strong demand of the consumers for antic art furniture and dishes). The interest in classical antiquities was part of the neo-classical movement that aimed to regain for art and design the purity of form and expression that was felt lacking in the rococo style. The firms started to contract with professionals able to design and represent products that will sell (which means with aesthetical and stylish properties) and could be manufactured in pre-industrial process with a quality standard. Linked by these two imperatives, *being neither artists, nor technician but sharing competencies from both of these worlds*, industrial designers came to be.

With the work of Raymond Loewy, iconic designers who could determine the success or failure of products appeared. Loewy studied engineering 1910-1914. Then, he worked as fashion illustrator for Vogue and Harper's Bazaar, and designed costumes for Florenz Ziegfeld. He opened his own office in 1929 and his first product assignment was a duplicating (mimeograph) machine for Gestetner, which was introduced in 1933 and featured in a 1934 Fortune magazine article about the new profession of industrial design. In 1930, he patented his first automobile design, and soon designed the 1932 "cycle-fender" Hupmobile and the more radical 1934 model. At the Worlds Fair in 1939, he designed The House of Jewels' interiors. With Loewy the relationship between creative/artistic designers and industry became so strong they were now called industrial designers. During his carrier we can find all the different specialties this profession addresses: graphics, vehicles, products, packaging... On each of these dimensions, they are deeply linked to the industry and the manufacturing of products. Traditionally, industrial designers suffer from a particular curse since Loewy: *they need to control or master the final appearance and usage of a product by only giving an approximate definition at the beginning of the design process*. Moreover, they have a limited and traditional tool bag such as mockups and sketches to work with.

Both engineering design and 3D art professions were able to reuse the knowledge developed by academicians in the field of mathematics and computer science to create

their own software. But because they do not share a lot in common (they manipulate different models, do not have the same capacities for manufacturing, editing, animating and rendering) they are usually not compatible (and it can be even more difficult with the massive use of 2D tools at the beginning of the process). Transforming objects from one world to another is possible but a lot of data is lost in the process (Kim, Pratt, Iyer, & Sriram, 2006). And we can here see the dilemma that the industrial designers are facing. The industrial companies who hire them ask them to produce creative concepts. To be able to express freely their ideas they tend to use tools from the artistic world but these are poorly compatible with the industrial CAD tools (Arrighi, Le Masson, & Weil, 2012). On the other hand the engineering CAD tools are very well integrated, as the reference media for design. Being designed for the engineers they tend to dissect and decompose designs which contrary to the holistic approach of an industrial designer. As such, engineering design tools are not suitable for intensive creativity (Robertson, Walther, & Radcliffe, 2007) and do not give them the possibility to work on their principal innovative capabilities, aesthetics and meaning. *Industrial designers seem to be trapped between two types of tools they need to use none of which were made for them.*

This tendency is also explained by the poor understanding of this profession. When considering the Bauhaus, the first design school, we must not forget it is at least 200 years younger than the first engineering schools. Because their activities seemed very similar to those of artist or engineers, no one dealt with the necessity to design them dedicated tools. It is also interesting to note that contrary to the engineers and artists who were at first able to develop their own tools industrial designer never were capable of such enterprise. It can be explained by their non-computer specific competencies and by the fact that once the prototyping period is over (from the 60's to the 90's) a dominant model of CAD tool was already installed and it will be very hard for newcomer to be integrated or simply made compatible.

5.2 Paperless design: a better pill for industrial design profession and an obstacle for integration with engineering design

Starting in 90s, a radical change, the so-called “going paperless” was promoted in the industry both in design and marketing (Sabbagh, 1996). This movement caused the progressive disappearing of the draftsmen and of the hand drawing techniques in the industry. This was partly due to the fact that, in the middle 90's, 3D CAD technology began to be competitive with traditional methods in other fields. After years of confinement in the automotive and aircraft, it was becoming possible to economically design kitchenware and other domestic products with complex 3D shapes using a computer. This capacity was brought about by the increasing number of CAD software and the democratization of personal computers. Those were powerful enough by then to run 3D software for modest prices. SolidWorks® harvested a great part of this new market. At its release in 1993, it offers for a relatively low price (compared to other CAD software) making it accessible to industrial product design for most of the everyday objects (such as electronics, apparel, packaging, etc.)

The high-end competitors such as CATIA continued their growth by incorporating more functions to their products. This led to CAD tools with the capacity to manage the whole design process and the data it produces, from the design of factory to the management of spare parts, including assembly and maintenance operations. The PLM/PDM began to be installed as an imperative for the CAD software design companies, making paper even scarcer.

The disappearing of the traditional media was seen as a blessing for most of the managers but the industrial design practices, such as very intensive creativity phases, were very much challenged. Being used to work with traditional media, it became hard for the

industrial designers, to express themselves, especially in industries where they interfere at the early design steps. When an industrial designer studies a curve on a full size drawing, he can visually detect shape defects such as flat spots, unwanted inflections, etc. CAD system would then provide methods to improve the given shape. As the design process moved away from the drawing board and into the computer screens, this visual inspection process was not feasible any more since a full-scale drawing was out of the question. The scaled down display offered by the computer did not allow detecting shape imperfections in a direct way.

The paperless design has naturally affected the work of industrial designers but also their integration with the downstream engineering processes. Having only indirect means to interact with designs and being not integrated into the PLM/PDM processes through adapted tools, they are pushed to intervene at the beginning or at the end of the design process. As an example, we can consider the design of Volt concept, Figure 7. In this project, designers were only solicited at the very beginning of design process and they did not have the capacity to control the organization and manufacturing. The original work was transformed to such a point that it bore little similarity, if any, with the concept produced by the industrial designers.



Figure 7. On the left Volt concept Car, great success at January 2007 North American International Auto Show. On the right Volt serial car 2011. During the time some notably changes happen in the “package” (global dimensions of the car) that had hard impact over its final style.

This kind of lack of coordination and integration of both types of design processes has, in most cases, severe consequences for companies. Such consequences cannot be ignored, since they directly affect the brand image and market success, just like in the Volt concept car example.

5.3 Re-integrating industrial designers through adapted software

In previous sections, we have seen the tradition of industrial design practice and obstacles to their integration to engineering design processes. Combined with the review of design rationale of engineering and artistic CAD tools, we are now in a position to formulate functional requirements and design parameters for effective industrial design CAD tools.

From the analysis we have presented so far we see that what industrial designers need from the tool is the ability to produce manufacturable 3D models using interfaces that allow direct and intuitive manipulation of the object being designed. This is an overall requirement that necessitates combining several functional requirements from both engineering CAD and 3D artistic CAD domains.

From the realm of engineering design tools, several requirements need to be adopted and integrated into the industrial design tools. To start, for manufacturing purposes, there is an imperative of reusability and re-adaptability of previous designs. A derived requirement is the possibility to propagate changes. This has been handled by engineering design software by the use of a design tree. A design tree basically stores, all

the elementary operations that have been undertaken on a design, so that, when something is changed, only the related operations are considered. This induces a major handicap for several propositions of industrial design tools existing in the literature. Since they privilege the modes of interactions based on the clay modeling metaphor, a history of operations compatible with engineering design tool's design trees is not kept.

A related issue to this is the tool's ability to translate between the different data formats used by the engineering design tools and the industrial design tools. In order to avoid the information loss by the aforementioned design-gap, this requirement becomes crucial. Let us note that, very few, if none, geometric modelers are able to handle this type of conversion without significant loss of information. One notable exception is the CATIA®'s convergence geometric modeling kernel. This system has been invented for transitioning between a great variety of models (do clouds, dexels, subdivisions, NURBS, etc). Despite its invention in 1995, it has taken several years before for its potential to be realized and it was integrated into the software suite; allowing seamless transition between various types of 3D models for engineering design environments.

Aside these requirements about the compatibility with other engineering software, industrial design tools need also to be able to represent object with a very high surface quality. This is needed especially for achieving high levels of precision in manufacturing. Thus, it would be required to have potentially infinite sampling of a shape (i.e. the ability to zoom in infinitely). Unfortunately, the polygonal modeling used in standard 3D artistic software does not allow this, since the size of sampling is fixed or difficult to change due to various constraints.

On the other hand, industrial designer has to import several requirements from his own world. In order to not to abandon their traditional ways of working completely, they need indeed interfaces that allow direct manipulations of designed objects. Currently, this poses a problem since the data format used in most of the current industrial design software allowing direct manipulations are not fully compatible with design tree and surface quality requirements. Also, industrial designers need to be able to work with arbitrarily complex forms. Although clay modeling metaphor allow editing such forms in a convenient way for the designer, the data output does not respect the mathematical precision required by other engineering software.

In addition, industrial designers require having both a holistic view of the object being designed and the ability to go in very local details. In practice, this implies being able to realize modifications that need to be propagated only locally. As a design parameter, one way of dealing with this issue is to use modification cages - which limits the way an object can be deformed. Another possibility is to use a special form of subdivision technique. As we have previously seen, subdivision technique allows flexibility and ease in modifying a shape locally. However, propagating those local changes without deteriorating the coherence of the model is hard. A technique that is relatively new that has been successful in dealing with this issue is the subdivision surfaces constructed on nurbs together with a set of rules orchestrating the way changes should be transferred to adjacent surfaces. This is however a computationally demanding technique.

Nevertheless, these technical challenges, be it computational or not, need to be addressed in order to contribute to the integration of industrial designers with engineering design processes. In fact, we can observe a slow convergence between these two types of software environments as techniques that were exclusive are becoming commonly used in both environments (Purcell, 2002; Raposo, 2006; Lasram, 2012). In the next years, the next criteria for industrial design tools seem to be the capacity to integrate user feedbacks, use scenarios and emotions as requirements. Some promising proposals have already started to emerge (Nagamachi, 2002). A final requirement is the ability to demonstrate – at the digital mockup stage what the future consumers will experience with the use of the

product, using virtual and augmented reality techniques. This also means that industrial CAD tools will have to integrate more capacities from the artistic world, such as lighting tools and animation.

6 Conclusion and discussion

The identification of CAD tools for industrial design also gave very important insights about the CAD tools for their counterparts, engineers and 3D artists. In this final section, we summarize these insights that lead to a characterization of these different types of tools.

Engineering CAD tools

In this type of CAD tools there are no modification of the initial design parameters and FR. The design expansion is the making of a rule defining the relationship between design parameters and FR, with a validity of design parameters and FR. The target for this class of designers is not to reach a single object, rather to obtain a family of objects, defined by the same set of rules. By varying the parameters of the rules it is possible to generate a large collection of different objects. We call this tendency mass variety. The global tendency of this type of software is the capacity to generate rules addressing more design parameters and FR, implying more heterogeneous disciplines, and to validate them across wider and more precise domains.

CAD tools for 3D Artist

The 3D artists require the ability to expand to a maximum the list of design parameters and FR. There are no rules and domains, only a unique result that is required to be the denser possible in details and meaning. They build ad-hoc relations between design parameters and functional requirements and there is very few information about the relative importance of any given design parameters or FR. Some design parameters and functional requirements at one step could entirely be given up or be considered of less importance at the next step (relative importance of realism, details or reflections). The target is a singular and original realization. The global tendency of this type of software is to have more functional requirements reachable, thanks to an increase of the number of design parameters available. We call this tendency maximal singularity.

CAD tools for ID

The industrial design is looking for new and original design parameters and functional requirements and in the meantime tries to generate new rules between those design parameters and FR. It is different from engineering design because the rule is not the unique target, the design parameters and functional requirements must also be formulated and generated. It is also different from 3D artist CAD tools because the expansion of design parameters and functional requirements is not enough, there is a need to converge on a restricted list which allows the description of a local domain and a stabilized relationship between design parameters and FR. The target is to obtain a massive (a new rule suitable on a validity domain) singularity (new design parameters and new FR). It is the design of a new conceptual model. We call this tendency mass singularity.

References

- Arrighi, P.-A., Le Masson, P., & Weil, B. (2012). Breaking The Dilemma Between Robustness And Generativeness, An Experimental Assessment Of A New Software Design Suite. International Product Management Conference. Manchester.
- Arrighi, P.-A., Kazakci, A. (2013, August). Lack of Integration Between Engineering Industrial Design Processes. In Proceedings of the 21st International Conference of Engineering Design (ICED'13), Seoul, Korea.
- Bae, S.-H., Balakrishnan, R., & Singh, K. (2008). ILoveSketch: As-Natural-As-Possible Sketching System. Toronto: Department of Computer Science, University of Toronto.
- Barone, M. (2004). The Process Improvement Impact on the Styling Workflow. EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling. EuroGraphics Digital Library.
- Berkowitz, M. (1987). Product shape as a design innovation strategy. Journal Of Product Innovation Management , 274-283.
- Bezier, P. (1972) Numerical control; mathematics and applications. John Wiley & Sons Ltd
- Bodein, Y., Rose, B., & Caillaud, E. (2012). Decisional Model for KBE Implementation in a Commercial CAD Software. Computer-Aided Design and Applications, 9, 121-131.
- Bouchard, C., Omhover, J. F., Mougnot, C., Aoussat, A., & Westerman, S. J. (2008). TRENDS: A content-based information retrieval system for designers. In Design Computing and Cognition'08 (pp. 593-611). Springer Netherlands.
- Bozdoc, M. (1999-2003). Retrieved 2010 from The History Of CAD: <http://www.mbdesign.net/mbinfo/CAD-History.htm>
- Catmull, E., & Clark, J. (1978). A Subdivision Algorithm for Computer Display of Curved Surfaces. Computer-Aided Design , 350-355.
- Chaikin, G. M. (1974). An algorithm for high-speed curve generation. *Computer graphics and image processing*, 3(4), 346-349.
- Choi, S. H., & Cheung, H. H. (2005). A multi-material virtual prototyping system. Computer-Aided Design, 37(1), 123-136.
- Daloz, P. (2010). Concevoir les outils du bureau d'études: Dassault Systèmes, une firme innovante au service des concepteurs. (P. Fridenson, B. Weil & P. Le Masson, Interviewers)
- Deschênes, F., Ziou, D., & Fuchs, P. (2004). An unified approach for a simultaneous and cooperative estimation of defocus blur and spatial shifts. Image and Vision Computing, 22(1), 35-57.
- Dori, D., & Tombre, K. (1995). From engineering drawings to 3D CAD models: are we ready now?. *Computer-Aided Design*, 27(4), 243-254.
- Dorta, T., Perez, E., & Lesage, A.-M. (2008). The Ideation Gap: Hybrid Tools, Design Flow And Practice. Design Studies , 121-141.
- Dym, C. L., Agogino, A. M., Eris, O., Frey, D. D., & Leifer, L. J. (2005). Engineering design thinking, teaching, and learning. Journal of Engineering Education, 94(1), 103-120

- Dyn, N., Floater, M. S., & Hormann, K. (2009). Four-point curve subdivision based on iterated chordal and centripetal parameterizations. *Computer Aided Geometric Design*, 26(3), 279-286.
- Farin, G., Hoschek, J., & Kim, M. S. (2002). *Curves and Surfaces for CAGD, Fourth Edition: A Practical Guide*. North-holland.
- Forty, A. (1992). *Objects Of Desire*. Thames & Hudson.
- Fuchs, P., & Nashashibi, F. (1998). De la CAO à la réalité virtuelle. *Revue internationale de CFAO et d'informatique graphique*, 13(2), 131-167.
- Gross, M. D., & Do, E. Y. L. (1996, November). Ambiguous intentions: a paper-like interface for creative design. In *Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology* (pp. 183-192). ACM.
- Igarashi, T., Matsuoka, S., & Tanaka, H. (2007, August). Teddy: a sketching interface for 3D freeform design. In *ACM SIGGRAPH 2007 courses* (p. 21). ACM.
- Kazakci, A. and P. Le Masson (2012). On the use of design theories in organizational and innovation processes. *International Design Conference*, Dubrovnik, Croatia.
- Kang, Y., Kim, H., Suzuki, H., & Han, S. (2013). Feature-based 3D CAD Modeling on Smart Device Using Multi-touch Gesture. *International Journal of CAD/CAM*, 13(2).
- Keefe, D. F., Feliz, D. A., Moscovich, T., Laidlaw, D. H., & LaViola Jr, J. J. (2001, March). CavePainting: a fully immersive 3D artistic medium and interactive experience. In *Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics* (pp. 85-93). ACM.
- Keller, E. (2012). *Introducing ZBrush 3rd Edition*. John Wiley & Sons.
- Kelly, J. C., Maheut, P., Petiot, J. F., & Papalambros, P. Y. (2011). Incorporating user shape preference in engineering design optimisation. *Journal of Engineering Design*, 22(9), 627-650.
- Kim, J., Pratt, M. J., Iyer, R. G., & Sriram, R. D. (2006). Standardized data exchange of CAD models with design intent. *Computer-Aided Design*, 760-777.
- Kowalski, M. A., Markosian, L., Northrup, J. D., Bourdev, L., Barzel, R., Holden, L. S., & Hughes, J. F. (1999, July). Art-based rendering of fur, grass, and trees. In *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 433-438). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co..
- Lasram, A., Lefebvre, S., & Damez, C. (2012, May). Procedural texture preview. In *Computer Graphics Forum* (Vol. 31, No. 2pt2, pp. 413-420). Blackwell Publishing Ltd.
- Lasram, A., & Lefebvre, S. (2012, June). Parallel patch-based texture synthesis. In *Proceedings of the Fourth ACM SIGGRAPH/Eurographics conference on High-Performance Graphics* (pp. 115-124). Eurographics Association.
- Le Masson, P., Weil, B., & Hatchuel, A. (2006). *Les processus d'innovation: Conception innovante et croissance des entreprises*. Hermes science publ.
- Le Masson, P., & Weil, B. (2010). La conception innovante comme mode d'extension et de régénération de la conception réglée: les expériences oubliées aux origines des bureaux d'études. *Entreprises Et Histoire*, 51-73.
- Liu, X., Dodds, G., McCartney, J., & Hinds, B. K. (2004). Virtual DesignWorks—designing 3D CAD models via haptic interaction. *Computer-Aided Design*, 36(12), 1129-1140.
- Loewy, R. (1963). *La Laideur se vend mal*. Gallimard.

- Loop, C., & Schaefer, S. (2008). Approximating Catmull-Clark subdivision surfaces with bicubic patches. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 27(1), 8.
- Loop, C., Schaefer, S., Ni, T., & Castaño, I. (2009, December). Approximating subdivision surfaces with Gregory patches for hardware tessellation. In *ACM Transactions on Graphics (TOG; Vol. 28, No. 5, p. 151)*. ACM.
- Mandil, G., Serré, P., Mireille, M., & Desrochers, A. (2011). Geometrical tools for the description and control of functional specifications at the conceptual design phase. *IJODIR*, 5(1).
- Mishkinis, A., Gentil, C., Lanquetin, S., & Sokolov, D. (2012). Approximate convex hull of affine iterated function system attractors. *Chaos, Solitons & Fractals*, 45(11), 1444-1451.
- Moisdon *Du mode d'existence des outils de gestion*. Ed. Seli Arslan, 1997.
- Nagamachi, M. (2002). Kansei engineering as a powerful consumer-oriented technology for product development. *Applied ergonomics*, 33(3), 289-294.
- Nealen, A., Igarashi, T., Sorkine, O., & Alexa, M. (2007). FiberMesh: designing freeform surfaces with 3D curves. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 26(3), 41.
- Ouertani, M. Z., Baïna, S., Gzara, L., & Morel, G. (2011). Traceability and management of dispersed product knowledge during design and manufacturing. *Computer-Aided Design*, 43(5), 546-562.
- Purcell, T. J., Buck, I., Mark, W. R., & Hanrahan, P. (2002). Ray tracing on programmable graphics hardware. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 21(3), 703-712.
- Raposo, A., Corseuil, E. T., Wagner, G. N., dos Santos, I. H., & Gattass, M. (2006, June). Towards the use of cad models in VR applications. In *Proceedings of the 2006 ACM international conference on Virtual reality continuum and its applications* (pp. 67-74). ACM.
- Rampino, L. (2011). The innovation pyramid: A categorization of the innovation phenomenon in the product-design field. *International Journal of Design*, 5(1), 3-16.
- Robertson, B. F., Walther, J., & Radcliffe, D. F. (2007). Creativity And The Use Of CAD Tools: Lessons for Engineering Design Education From Industry. *Journal Of Mechanical Design*.
- Rowe, P. G. (1991). *Design Thinking*. The MIT Press
- Stergiopoulos, P., Fuchs, P., & Laurgeau, C. (2003). Design of a 2-finger hand exoskeleton for VR grasping simulation. *Eurohaptics*, Dublin, Ireland, 80-93.
- Suh, N. P. (2001). *Axiomatic design: advances and applications* (Vol. 4). New York: Oxford university press.
- Sutherland, I. E. (1964, January). Sketch pad a man-machine graphical communication system. In *Proceedings of the SHARE design automation workshop* (pp. 6-329). ACM.
- Thurgood, P., & Clark, J. (2001). Use of 3D non-contact digitisation and 3D touch modelling systems within automotive seating design. In *Proceedings of TCT Conference*. Chester, UK: Rapid News Publications (pp. 177-188).
- Tovey, M. (1997). Styling and design: intuition and analysis in industrial design. *Design Studies*, 18(1), 5-31.
- Tovey, M. (2002). Concept design CAD for the automotive industry. *Journal of Engineering design*, 13(1), 5-18.
- Umbaugh, Scott E. CRC Press, (2005) *Computer Imaging: Digital Image Analysis And Processing*

- Verganti, R. (2008). Design, meanings and radical innovation: A Meta-Model And A Research Agenda. *Journal of Product Innovation Management*.
- Von Stamm, B. (2008). *Managing innovation, design and creativity*. John Wiley & Sons.
- Weisberg, D. (2006). *The Engineering Design Revolution — The People, Companies and Computer Systems That Changed Forever the Practice of Engineering*.
- Whited, B., Daniels, E., Kaschalk, M., Osborne, P., & Odermatt, K. (2012, August). Computer-assisted animation of line and paint in Disney's Paperman. In *ACM SIGGRAPH 2012 Posters* (p. 19). ACM.
- Xue, D. *Design Process Modeling for the Future CAD Systems* (2005) Proceedings of the Canadian Engineering Education Association
- Zhang, D. H., Yan, F. X., Hou, Z. X., & Kang, W. K. (2009, November). Virtual Clay Modeling System with 6-DOF Haptic Feedback. In *Materials Science Forum* (Vol. 628, pp. 155-160).
- Smith., G. (2005). Misunderstood and Mysterious: How Design and Designers are Perceived by Design Professionals, Design Educators and the Public, Swinburne University of Technology.

Huitième partie

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Abraham, A., & Windmann, S. (2008). Selective information processing advantages in creative cognition as a function of schizotypy. *Creativity Research Journal*, **20**, p 1–6.
- [2] Agogu  , M. (2012). Modéliser l’effet des biais cognitifs sur les dynamiques industrielles : Innovation orpheline et architecte de l’inconnu. *Doctoral dissertation*, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [3] Arrighi, P-A., & Kazakci, O. (2013). Lack of integration between engineering industrial design processes. *International Conference on Engineering Design 2013*, **9**, p 039–048.
- [4] Bae, S. H., Balakrishnan, R., & Singh, K. (2008). ILoveSketch : as-natural-as-possible sketching system for creating 3d curve models. *Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User interface software and technology*, **1**, p 151–160.
- [5] Berkowitz, M. (1987). Product shape as a design innovation strategy. *Journal of Product Innovation Management*, **4**, p 274–283.
- [6] Betts, P. (1998). Science, Semiotics and Society : The Ulm Hochschule f  r Gestaltung in Retrospect. *Design Issues*, **14**, p 67–82.
- [7] Bial  s, C. (2013). La gestion. *Les cahiers   conomie et gestion*, **65**, p 25–30.
- [8] Blanchard, C., Burgess, S., Harvill, Y., Lanier, J., Lasko, A., Oberman, M., & Teitel, M. (1990). Reality built for two : a virtual reality tool. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, **24**, p 35–36.
- [9] Bouchard, C., Lim, D., & Aoussat, A. (2003). Development of a Kansei Engineering System for industrial design. *Proceedings of the Asian Design International Conference*, **1**, p 1–12.
- [10] Bowker, G. C. (2010). Schlumberger’s bureau d’  tudes. *Entreprises et histoire*, **58**, p 165–169.
- [11] Bozdoc, M. (2004). The history of CAD. [http ://www.mbdesign.net/mbinfo/CAD-History.htm](http://www.mbdesign.net/mbinfo/CAD-History.htm)

- [12] Braha, D., & Reich, Y. (2003). Topological structures for modelling engineering design processes. *Research in Engineering Design*, **14**, p 185–199.
- [13] Brown, B., MacColl, I., Chalmers, M., Galani, A., Randell, C., & Steed, A. (2003). Lessons from the lighthouse : collaboration in a shared mixed reality system. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, **1**, p 577–584.
- [14] Brown, T. (2008). Design thinking. *Harvard business review*, **86**, p 84–96.
- [15] Burdea, G., & Coiffet, P. (2003). Virtual reality technology. *Presence : Teleoperators and virtual environments*, **12**, p 663–664.
- [16] Buxton, B. (2010). Sketching User Experiences : Getting the Design Right and the Right Design. *Morgan Kaufmann*.
- [17] Carlsson, C., & Hagsand, O. (1993). DIVE A multi-user virtual reality system. *Virtual Reality Annual International Symposium (IEEE 1993)*, **1**, p 394–400.
- [18] Chapman, C. B., & Pinfold, M. (2001). The application of a knowledge based engineering approach to the rapid design and analysis of an automotive structure. *Advances in Engineering Software*, **32**, p 903–912.
- [19] Chayutsahakij, P., & Poggenpohl, S. (2002). User-centered innovation : The interplay between user-research and design innovation. *Proceedings of the European Academy of Management 2nd Annual Conference on Innovative Research in Management*, **118**, p 1–10.
- [20] Cohen, H., & Lefebvre, C. (2005). *Handbook of categorization in cognitive science*, **4**. Amsterdam : Elsevier.
- [21] Convard, T. (2005). Conception assistée par ordinateur en environnement immersif . *Doctoral dissertation*, Université de Paris 11.
- [22] Cooper, R. G. (1988). Winning at new products. *London : Kogan Page*.
- [23] Cooper, R. G., Edgett, S. J., & Kleinschmidt, E. J. (2002). Optimizing the Stage-Gate Process : What Best-practice Companies Do. *Research-Technology Management*, **45**, p 21–27.
- [24] Cross, N. (2006). Designerly ways of knowing. *London : Springer*.
- [25] CRTRV (2004). Le comité de rédaction du traité de la réalité virtuelle. *Dossier de présentation du TRV3*.
- [26] Cuffaro, D. F., Vogel, B., & Matt, B. (2002). Why good design doesn't always guarantee success. *Design Management Journal*, **13**, p 49–55.
- [27] Daloz, P., et al., (2010). Concevoir les outils du bureau d'études : Dassault Systèmes, une firme innovante au service des concepteurs. *Entreprises et histoire*, **58**, p. 150–164.

- [28] De Vaujany, F. X. (2003). Modelling IT use : an archetypal approach. *Electronic Journal of Information Systems Evaluation*, **6**, p 1–11.
- [29] Dorta, T., Pérez, E., & Lesage, A. (2008). The Ideation Gap : Hybrid tools, Design flow and Practice. *Design Studies*, **29**, p 121–141.
- [30] Dorta, T., Lesage, A., Pérez, E., & Bastien, J. C. (2011). Signs of Collaborative Ideation and the Hybrid Ideation Space. Design Creativity 2010. *London : Springer London*.
- [31] Dorta, T., Lesage, A., & Di Bartolo, C. (2012). Collaboration and design education through the interconnected HIS : Immature vs. *Mature CI Loops observed through Ethnography by Telepresence, Physical Digitality*, **2**, p 97–105.
- [32] Droste, M. (2002). Bauhaus : 1919-1933. *Cologne : Taschen*.
- [33] Dym, C. L., Agogino, A. M., Eris, O., Frey, D. D., & Leifer, L. J. (2005). Engineering design thinking, teaching, and learning. *Journal of Engineering Education*, **94**, p 103–120.
- [34] Fällman, D. (2003a). Design-oriented human-computer interaction. *Proceedings of the ACM-SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, **1**, p 225–232.
- [35] Fällman, D. (2003b). In romance with the materials of mobile interaction. *Doctoral dissertation*, Department of Informatics, Umeå University.
- [36] Fiorentino, M., de Amicis, R., Monno, G., & Stork, A. (2002). Spacedesign : A mixed reality workspace for aesthetic industrial design. *Mixed and Augmented Reality 2002*, **1**, p 86–318.
- [37] Fuchs, P. (1996). Les interfaces de la réalité virtuelle. *Paris : Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris*.
- [38] Fuchs, P., & Nashashibi, F. (1998). De la CAO à la réalité virtuelle. *Revue internationale de CFAO et d'informatique graphique*, **13**, p 131–167.
- [39] Fuchs, P., Moreau, G., Papin, J. P., & Berthoz, A. (2000). Le traité de la réalité virtuelle. *Paris : Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris*.
- [40] Gedenryd, H. (1998). How designers work : Making sense of authentic cognitive activities. *Doctoral dissertation*, Lund University Cognitive Science.
- [41] Gemser, G., & Leenders, M. A. (2001). How integrating industrial design in the product development process impacts on company performance. *Journal of Product Innovation Management*, **18**, p 28–38.
- [42] Goel, V. (1995). Sketches of thought. *Cambridge, MA : MIT Press*.
- [43] Gibson, J.J. (1979). The Ecological Approach to Visual Perception. *Boston : Houghton Mifflin*.

- [44] Goldschmidt, G. (2011). The black-curtained studio : Eulogy to a dead pencil. *Proceedings of Spatial Cognition for Architectural Design*, **1**, p 16–19.
- [45] Goldschmidt, G. (1991). The dialectics of sketching. *Creativity Research Journal*, **4**, p 123–143.
- [46] Harmancioglu, N., McNally, R. C., Calantone, R. J., & Durmusoglu, S. S. (2007). Your new product development (NPD) is only as good as your process : an exploratory analysis of new NPD process design and implementation. *R&D Management*, **37**, p 399–424.
- [47] Hatchuel, A., & Weil, B. (2003). A new approach of innovative design : an introduction to CK theory. *Proceedings, International Conference on Engineering Design 2003*, **1** p 109–119.
- [48] Hatchuel, A., Le Masson, P., & Weil, B. (2005). The Development of Science Based Products : Managing by Design Spaces. *Creativity and innovation management*, **14**, p 345–354.
- [49] Hatchuel, A., & Weil, B. (2009). CK design theory : an advanced formulation. *Research in engineering design*, **19**, p 181–192.
- [50] Hatchuel, A., Le Masson, P., Reich, Y., & Weil, B. (2011). A systematic approach of design theories using generativeness and robustness. *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design 2011*, **2**, p 87–97.
- [51] Hatchuel, A. (2013). Deconstructing meaning : Industrial design as Adornment and Wit. *Proceedings of the 10th European Academy of Design Conference*, **1**, p 1–15.
- [52] Herstatt, C., & Verworn, B. (2001). The "fuzzy front end" of innovation . *Working Papers/Technologie-und Innovations management*, Technische University, Hamburg-Harburg.
- [53] Hertenstein, J. H., Platt, M. B., & Veryzer, R. W. (2005). The Impact of Industrial Design Effectiveness on Corporate Financial Performance. *Journal of Product Innovation Management*, **22**, p 3–21.
- [54] Itten, J. (1975). Design and form. *New York : Wiley*.
- [55] Jansson, D. G., & Smith, S. M. (1991). Design fixation. *Design Studies*, **12**, p 3–11.
- [56] JPIM, (2005a). *Journal of Product Innovation Management*, **22**, Special Issue 1.
- [57] JPIM, (2005b). *Journal of Product Innovation Management*, **22**, Special Issue 2.

- [58] Jones, J.C. (1992). Design methods. *New York : Van Nostrand Reinhold*.
- [59] Karniel, A., Reich, Y. (2011). Managing the Dynamics of New Product Development Processes : The New Product Lifecycle Management Paradigm. *Springer*.
- [60] Kelley, T., & Littman, J. (2001). The art of innovation : lessons in creativity from IDEO, America's leading desing firm. *Crown Business*.
- [61] Kim, J., & Wilemon, D. (2002). Focusing the fuzzy front-end in new product development. *Research and Development Management*, **32**, p 269–279.
- [62] Kline, S. J., & Rosenberg, N. (1986). An overview of innovation. The positive sum strategy : Harnessing technology for economic growth. *Washington, DC : The National Academies Press*.
- [63] Koen, P., Ajamian, G., Burkart, R., Clamen, A., Davidson, J., D'Amore, R., & Wagner, K. (2001). Providing clarity and a common language to the "fuzzy front end". *Research-Technology Management*, **44**, p 46–55.
- [64] Khurana, A., & Rosenthal, S. R. (1997). Integrating the fuzzy front end of new product development. *Sloan management review*, **38**, p 103–120.
- [65] Lehner, V. D., & DeFanti, T. A. (1997). Distributed virtual reality : Supporting remote collaboration in vehicle design. *Computer Graphics and Application*, **17**, p 13–17.
- [66] Le Masson, P., Weil, B., & Hatchuel, A. (2006). Les processus d'innovation : Conception innovante et croissance des entreprises. *Paris : Hermes science publications*.
- [67] Le Masson, P., & Weil, B. (2010a). Aux sources de la R&D : genèse des théories de la conception réglée en Allemagne (1840-1960). *Entreprises et histoire*, **58**, p 11–50.
- [68] Le Masson, P., & Weil, B. (2010b). La conception innovante comme mode d'extension et de régénération de la conception réglée : les expériences oubliées aux origines des Bureaux d'études. *Entreprises et histoire*, **58**, p 51–73.
- [69] Le Masson, P., Hatchuel, A., & Weil, B. (2011). The interplay between creativity issues and design theories : a new perspective for design management studies ? *Creativity and Innovation Management*, **20**, p 217–237.
- [70] Loewy, R. F. (1963). La laideur se vend mal. *Paris : Gallimard*.
- [71] Lojacono, G., & Zaccai, G. (2012). The evolution of the design-inspired enterprise. *Sloan Management Review*, **45**, p 75–79.
- [72] Lubart, T. (2005). How can computers be partners in the creative process : classification and commentary on the special issue. *International Journal of Human-Computer Studies*, **63**, p 365–369.

- [73] Mahdjoub, M., Monticolo, D., Gomes, S., & Sagot, J. C. (2010). A collaborative design for usability approach supported by virtual reality and a multi-agent system embedded in a PLM environment. *Computer-Aided Design*, **42**, p 402–413.
- [74] Mahmoud-Jouini, S., Garel, G., Midler, C. (2004). Time to market vs time to delivery-Managing speed in engineering procurement and construction projects. *Int. J. of Project Management*, **22**, p 359–367.
- [75] Maldonado, T. (1960). New developments in industry and the training of designers. *ULM, School of Design*.
- [76] Micheli, P., Jaina, J., Goffin, K., Lemke, F., & Verganti, R. (2012). Perceptions of Industrial Design : The “Means” and the “Ends”. *Journal of Product Innovation Management*, **29**, p 687–704.
- [77] Midler, C. (1993). L’auto qui n’existait pas : management des projets et transformation de l’entreprise. *InterEditions*.
- [78] Moisdon, J-C. (1997). Du mode d’existence des outils de gestion. *Paris : Seli Arslan*
- [79] Mozota, B. B. D. (2002). Design management. *Paris : Éditions d’Organisation*.
- [80] Nadel, L., & Piattelli-Palmarini, M. (2003). What is cognitive science. *Encyclopedia of cognitive science, London : Macmillan*.
- [81] Nagamachi, M. (2002). Kansei engineering as a powerful consumer-oriented technology for product development. *Applied ergonomics*, **33**, p 289–294.
- [82] Norman, D. A., & Verganti, R. (2012). Incremental and Radical Innovation : design research versus technology and meaning change. *Design Issues*, **30**, p 78–96.
- [83] Nussbaum, B., Berner, R., & Brady, D. (2005). Get creative. *Business Week*, **3945**, p 60–68.
- [84] Pahl, G., Beitz, W. (2007). Engineering design : A Systematic Approach Third Edition. *London : Springer London Ltd*.
- [85] Paulus, P. B., & Nijstad, B. A. (2003). Group creativity : Innovation through collaboration. *Oxford : Oxford University Press*.
- [86] Rampino, L. (2011). The innovation pyramid : A categorization of the innovation phenomenon in the product-design field. *International Journal of Design*, **5**, p 3–16.
- [87] Rieuf, V. (2013). Impact of the Immersive Experience on Kansei During Early Immersive. *Doctoral dissertation. Arts et Métiers ParisTech*.

- [88] Rittel, H. W., & Webber, M. M. (1973). Dilemmas in a general theory of planning. *Policy Sciences*, **4**, p 155–169.
- [89] Reid, S. E., & De Brentani, U. (2004). The fuzzy front end of new product development for discontinuous innovations : a theoretical model. *Journal of product innovation management*, **21**, p 170–184.
- [90] Reinertsen, D. G. (1999). Taking the fuzziness out of the fuzzy front end. *Research-Technology Management*, **42**, p 25–31.
- [91] Roy, R. (1993). Case studies of creativity in innovative product development. *Design Studies*, **14**, p 423–443.
- [92] Schön, D. A. (1983). The reflective practitioner : How professionals think in action. *New York : Basic books*.
- [93] Schön, D. A. (1987). Educating the reflective practitioner. *San Francisco : Jossey-Bass*.
- [94] Shai, O., & Reich, Y. (2004). Infused Design : II Practice. *Research in Engineering Design*, **15**, p 108–121.
- [95] Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, **364**, p 3549–3557.
- [96] Smith, S. M., Ward, T. B., & Schumacher, J. S. (1993). Constraining effects of examples in a creative generation task. *Memory & Cognition*, **21**, p 837–845.
- [97] Smith, S. M., Ward, T. B., & Finke, R. A. (1995). The Creative Cognition Approach. *Cambridge, MA : MIT Press*.
- [98] Smith, A. C. (2005). Complexity theory for organisational futures studies. *Foresight*, **7**, p 22–30.
- [99] Suh, N. P. (1990). Principles of Design. *New York : Oxford University Press*.
- [100] Suwa, M., & Tversky, B. (1996). What architects see in their sketches : Implications for design tools. *Proceedings of the ACM-SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems 1996*, **1**, p 191–192.
- [101] Suwa, M., & Tversky, B. (2002). External representations contribute to the dynamic construction of ideas. In Diagrammatic representation and inference. *Berlin : Springer Berlin Heidelberg*.
- [102] Swan, K. S., & Luchs, M. (2011). From the special issue editors : product design research and practice : past, present and future. *Journal of Product Innovation Management*, **28**, p 321–326.
- [103] Takeda, H., Veerkamp, P., & Yoshikawa, H. (1990). Modeling design process. *AI magazine*, **11**, p 37–48.

- [104] Thomke, S., & Fujimoto, T. (2000). The Effect of “Front ? Loading” Problem? Solving on Product Development Performance. *Journal of Product Innovation Management*, **17**, p 128–142.
- [105] Tornincasa, S., & Di Monaco, F. (2010). The future and the evolution of CAD. *Proceedings of the 14th international research/expert conference : trends in the development of machinery and associated technology*.
- [106] Tovey, M. (1997). Styling and design : intuition and analysis in industrial design. *Design Studies*, **18**, p 5–31.
- [107] Tovey, M. (2002). Concept design CAD for the automotive industry. *Journal of Engineering design*, **13**, p 5–18.
- [108] Ullman, D. G. (2003). The Mechanical Design Process Third edition. *McGraw Hill*.
- [109] Tucker, A. B. (2004). Computer science handbook. *Boca Raton, Florida : CRC press*.
- [110] Vredenburg, K., Isensee, S., & Righi, C. (2001). User-Centered Design : An Integrated Approach. *New Jersey : Prentice Hall*.
- [111] Verganti, R. (2008). Design, Meanings, and Radical Innovation : A Meta-model and a Research Agenda. *Journal of Product Innovation Management*, **25**, p 436–456.
- [112] Verganti, R. (2009). Design driven innovation : changing the rules of competition by radically innovating what things mean. *Boston, MA : Harvard Business Press*.
- [113] Veryzer, R. W., & Borja de Mozota, B. (2005). The Impact of User? Oriented Design on New Product Development : An Examination of Fundamental Relationships. *Journal of Product Innovation Management*, **22**, p 128–143.
- [114] Von Stamm, B. (2008). Managing innovation, design and creativity. *New York : John Wiley & Sons*.
- [115] Warburton, S., & García, M. P. (2010). 3D design and collaboration in massively multi-user virtual environments (MUVEs). *Cases on collaboration in virtual learning environments : processes and interactions*, **1**, p 27–41.
- [116] Ward, T. B. (1994). Structured imagination : the role of conceptual structure in exemplar generation. *Cognitive psychology*, **27**, p 1–40.
- [117] Ward, T. B., Patterson, M. J., & Sifonis, C. M. (2004). The role of specificity and abstraction in creative idea generation. *Creativity Research Journal*, **16**, p 1–9.

- [118] Wendrich, R.E. Tragter, H., Kokkeler, F.G.M., & Houten, F.J.A.M. van (2009). Bridging the Design Gap : Towards an Intuitive Design Tool. *Proceedings of the 26th ICSID World Design Congress and Education Congress*.
- [119] Whyte, J., Bouchlaghem, N., Thorpe, A., & McCaffer, R. (2000). From CAD to virtual reality : modeling approaches, data exchange and interactive 3D building design tools. *Automation in Construction*, **10**, p 43–55.

Modèles d'intégration des designers créatifs dans les processus de conception industriels

RESUME: De décisifs et puissants enjeux d'innovation ainsi que de renouvellement de l'identité des objets bouleversent le monde industriel. De telles aptitudes créatives sont usuellement associées aux designers industriels. Cependant, ces professionnels ne sont actuellement pas intégrés dans les processus numériques de conception.

Afin de décrire ce paradoxe, nous formulons l'hypothèse que, l'omniprésence dans l'industrie de modèles de la conception de type séquentiel, qui juxtaposent créativité et développement produit, entrave l'intégration des designers industriels au sein des processus industriels. En effet, en compartimentant la conception en silos, ce type de modèles généralistes inhibe les méthodes spécifiques des concepteurs créatifs. Bien plus, les outils numériques adjoints au modèle séquentiel étant calqués sur sa logique, ils reproduisent les bénéfices et les inconvénients d'une telle structuration.

En mobilisant quatre disciplines académiques qui traitent des outils numériques, à savoir les sciences informatiques, cognitives, de gestion et les théories de la conception, nous élaborons un nouveau modèle «dit stratifié». Ce dernier révèle les modes de raisonnement empruntés par les concepteurs créatifs ainsi que la nature des produits élaborés dans des environnements logiciels. A ce titre, l'entreprise Dassault Systèmes ainsi que la suite CATIA se sont révélés un substrat de recherche idéal afin de produire un modèle inédit favorable aux concepteurs industriels.

Comme attendu, notre nouveau modèle propose des assertions inédites qui sont validées au cours de notre travail. Nous avons alors démontré:

1/ Certains ateliers de conception favorisent simultanément robustesse ET générativité. Nous qualifions cette nouvelle propriété d'«originalité acquise».

2/ Les avatars dans le logiciel ne résultent pas d'un raffinement progressif de l'objet mais sont plutôt l'instanciation d'une base de règles paramétrée.

3/ Les designers industriels requièrent des outils distincts de ceux employés par les artistes 3D ou les ingénieurs, de par la nature de leur conception. Plus exactement, ces professionnels génèrent des modèles conceptuels selon une logique de singularité de masse.

Ces résultats offrent ainsi la perspective engageante de l'émergence d'une nouvelle génération d'outils numériques de conception. Ces outils inédits seront aptes à intégrer les designers industriels et à proposer de l'innovation à la demande.

Mots clés : Designer industriel, Conception, Créativité, Innovation, Outils numériques, Conception Assistée par Ordinateur (CAO), Réalité virtuelle, Dassault Systèmes, CATIA

Integration models for creative designers inside the industrial design process

ABSTRACT: Many studies show that industrial design is key to triggering, fostering and sustaining innovation. However, the unique capacities of creation and innovation of industrial designers make it challenging for them to thrive within industrial environments.

The challenge for companies is to create the optimal work environment for those professionals, while ensuring their work can be integrated smoothly into the existing industrial design processes.

We assume this dilemma is partially stemming from the intensive use of sequential design models in the industry. Design tools were developed on the assumption that creative front end and product development should be separated.

We introduce here a new model, aiming at depicting accurately the reasoning modes and the nature of the object being designed with the digital Computer Aided Design (CAD) suites. This model is the result of the joint mobilization of four academic fields: computer, cognitive and management science and design theories. Dassault Systèmes and their CATIA software have proven to be an excellent research environment for such questions. As we have been thinking, the new model (laminated) makes three new hypothesis.

Those unheard assertions have been suggested and validated with this thesis:

1/ some specific design workshops are able to provide simultaneously robust and generative design capacities. We call this characteristic "acquired originality".

2/ the object representations within by the software are not the result of successive refinements but derive directly from a parameterized set of rules.

3/ Industrial designers have specific requirements for CAD tools, different from their engineers and artists counterparts because what they design is fundamentally different. IDs generate conceptual models using a mass singularity technique.

Those results sketch the emergence of a new generation of CAD tools for industrial designers and able to foster innovation.

Keywords : Industrial design, Design, Creativity, Innovation, Digital tools, Computer Aided Design (CAD), Virtual reality, Dassault Systèmes, CATIA